

JSR B

E-ISSN: 2687 - 6167  
Number 2  
December 2020

# JOURNAL OF SCIENTIFIC REPORTS B

JOURNAL OF SCIENTIFIC REPORTS B - DECEMBER 2020 - NUMBER 2



Kutahya Dumlupinar University Scientific Reports B  
Evliya Celebi Campus Tavsanli Road 10 KM. 43270 Kutahya  
Phone : (0274) 443 19 42  
E-mail : [joursrb@gmail.com](mailto:joursrb@gmail.com)  
[gsjsrb.com](http://gsjsrb.com)

Dumlupinar University Press

gate of  
science

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Sayı 2, Aralık 2020



Journal of Scientific  
Reports-B  
E-ISSN: 2687-6167  
Number 2, December 2020

**Sahibi / Owner**

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Kütahya Dumlupınar University

**Yayın Kurulu / Editorial Board**

|                              |                                                        |
|------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Prof. Dr. Önder UYSAL        | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Maden Mühendisliği   |
| Prof. Dr. Cengiz YENİKAYA    | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Kimya                |
| Prof. Dr. Cengiz KARAGÜZEL   | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Maden Mühendisliği   |
| Prof. Dr. Gürsel YANIK       | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Jeoloji Mühendisliği |
| Doç. Dr. Cemal PARLAK        | Ege Üniversitesi / Fizik                               |
| Doç. Dr. Nevzat BEYAZIT      | Ondokuz Mayıs Üniversitesi / Çevre Mühendisliği        |
| Doç. Dr. Levent URTEKİN      | Ahi Evran Üniversitesi / Makine Mühendisliği           |
| Prof. Dr. Fatih ŞEN          | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Biyokimya            |
| Dr. Öğr. Üyesi Ümran ERÇETİN | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Makine Mühendisliği  |

Journal of Scientific Reports-B dergisi, yayın hayatına 2000 yılında başlayan Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi ayrılmış olup, Haziran ve Aralık aylarında olmak üzere yılda düzenli olarak 2 kez yayımlanan ulusal hakemli bir dergidir. Derginin yazım dili Türkçe ve İngilizce'dir. Dergiye gönderilen makaleler, editör kurulu tarafından seçilen ve konusunda uzman en az iki hakem tarafından değerlendirilmektedir. Dergiye sunulan bütün makaleler çift-körleme yöntemiyle değerlendirilmektedir. Değerlendirilmek üzere dergimize gönderilen makalelerin, daha önce yayınlanmamış, yayınlanmak üzere kabul edilmemiş ve yayınlanmak için başka bir dergide değerlendirilme sürecinde olmaması gerekmektedir. Dergide yayınlanan yazıların her türlü sorumluluğu yazar(lar)ına aittir.

Dergi, fen ve mühendislik bilimlerinde ulusal ve uluslararası düzeyde yapılan bilimsel çalışmalarını bilim insanları ve kamuoyu ile paylaşmayı amaçlar. Dergiye, fen ve mühendislik bilim dallarında yapılan, özgün araştırma makaleleri, derleme makaleleri ve kısa notlar kabul edilir. Özgün araştırma makalelerinin başka dergilerde yayınlanmamış olması, teorik ve deneysel sonuçlar içermesi beklenir. Derleme makalelerinde ise belirli bir konu üzerinde bilimsel, teknolojik ve güncel gelişmelerin geniş bir kaynakça kullanılarak yansıtılması ve bunların doyurucu bir değerlendirilmesinin yapılması aranır. Kısa notlar, özgün bir çalışmanın ilk bulgularının duyurulması amacıyla yönelik hazırlanan kısa yazılar olmalıdır.

**Yazışma Adresi:** Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Yerleşkesi Fen Bilimleri Enstitüsü 43270  
KÜTAHYA

**Telefon:** 0 274 443 19 42

**Faks:** 0 274 265 20 60

**E-posta:** [joursrb@gmail.com](mailto:joursrb@gmail.com)

**Web Sayfası:** [gsjsrb.com](http://gsjsrb.com)

Journal of Scientific Reports-B was separated from Journal of Science and Technology of Dumlupınar University which started its publication life in 2000 and is a national peer-reviewed journal published regularly twice a year in June and December. The language of the journal is Turkish and English. Articles submitted to the journal are

evaluated by at least two referees who are experts in the subject and selected by the editorial board. All articles submitted to the journal are evaluated by the double-blind method. Articles submitted to our journal for review should not be previously published, accepted for publication and in the process of being evaluated for publication in another journal. All responsibility for the articles published in the journal belongs to the author(s).

The journal aims to share scientific studies carried out in the fields of science and engineering at national and international level with scientists and the public. Original research articles, review articles and short notes in science and engineering disciplines are accepted for the journal. Original research articles are expected to contain theoretical and experimental results and should not be published in other journals. In the review articles, it is expected that scientific, technological and current developments on a specific subject are reflected by using an extensive bibliography and made a satisfying evaluation of these. Short notes should be brief writings prepared to announce the first findings of an original study.

**Correspondence Address:** Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Yerleşkesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
43270 KÜTAHYA

**Phone:** 0 274 443 19 29 - 30

**E-mail:** [joursrb@gmail.com](mailto:joursrb@gmail.com)

**Fax:** 0 274 265 20 60

**Webpage:** [gsjsrb.com](http://gsjsrb.com)

**Bölüm Editörleri / Section Editors**

|                                                                                                               |                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering</b><br>Prof. Dr. M. Çağatay KARABÖRK                               | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering</b><br>Prof. Dr. Ramazan KÖSE                                 | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical-Electronics Engineering</b><br>Dr. Öğr. Üyesi Kadir VARDAR   | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering</b><br>Doç. Dr. Doğan AYDIN                                 | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering</b><br>Dr. Öğr. Üyesi Kerem CİDDİ                           | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Maden Mühendisliği / Mining Engineering</b><br>Dr. Öğr. Üyesi Uğur DEMİR                                   | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Jeoloji Mühendisliği / Geology Engineering</b><br>Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer ÖZBURAN                          | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Metalurji ve Malzeme Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering</b><br>Prof. Dr. İskender IŞIK | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Gıda Mühendisliği / Food Engineering</b><br>Prof. Dr. Muhammet DÖNMEZ                                      | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Çevre Mühendisliği / Environmental Engineering</b><br>Doç. Dr. Nevzat BEYAZIT                              | Ondokuz Mayıs Üniversitesi      |
| <b>Matematik / Mathematics</b><br>Dr. Öğr. Üyesi Cansu KESKİN                                                 | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Fizik / Physics</b><br>Doç. Dr. Huriye Sanem AYDOĞU                                                        | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Kimya / Chemistry</b><br>Doç. Dr. Bülent ZEYBEK                                                            | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Biyoloji / Biology</b><br>Dr. Öğr. Üyesi Nüket Akalın BİNGÖL                                               | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>Biyokimya / Biochemistry</b><br>Doç. Dr. Derya KOYUNCU ZEYBEK                                              | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |
| <b>İş Sağlığı ve Güvenliği / Occupational Health and Safety</b><br>Prof. Dr. Cem ŞENSÖĞÜT                     | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi |

**Danışma Kurulu / Advisory Board**

|                                  |                                                          |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Prof. Dr. Sibel AKAR             | Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Kimya                 |
| Prof. Dr. Abdurrahman AKTÜMSEK   | Selçuk Üniversitesi / Biyoloji                           |
| Prof. Dr. Mustafa ALTUNOK        | Gazi Üniversitesi / Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği    |
| Prof. Dr. Uğur ARİFOĞLU          | Sakarya Üniversitesi / Elektrik-Elekt. Mühendisliği      |
| Prof. Dr. Oktay ARSLAN           | Balıkesir Üniversitesi / Kimya                           |
| Prof. Dr. Şükrü ASLAN            | Sivas Cumhuriyet Üniversitesi / Çevre Mühendisliği       |
| Prof. Dr. Ülfet ATAV             | Selçuk Üniversitesi / Fizik                              |
| Prof. Dr. Mustafa BAYRAKTAR      | TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi / Matematik       |
| Prof. Dr. Niyazi BİLİM           | Konya Teknik Üniversitesi / Maden Mühendisliği           |
| Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN        | Akdeniz Üniversitesi / Fizik                             |
| Prof. Dr. Erdal ÇELİK            | Dokuz Eylül Üniversitesi / Metalurji Malzeme Müh.        |
| Prof. Dr. Hayri DAYIOĞLU         | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Biyoloji               |
| Prof. Dr. Muhammet DÖNMEZ        | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Gıda Mühendisliği      |
| Prof. Dr. Mehmet Ali EBEOĞLU     | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Elektrik-Elekt. Müh.   |
| Prof. Dr. İsmail Göktaş EDİZ     | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Maden Mühendisliği     |
| Prof. Dr. İsmail EKİNCİOĞLU      | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Matematik              |
| Prof. Dr. Kaan ERARSLAN          | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Maden Mühendisliği     |
| Prof. Dr. Zeynal Abiddin ERGÜLER | Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Jeoloji Mühendisliği   |
| Prof. Dr. Seyhan FIRAT           | Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği                  |
| Prof. Dr. Remzi GÖREN            | Sakarya Üniversitesi / Met. Malzeme Müh.                 |
| Prof. Dr. Rasim İPEK             | Ege Üniversitesi / Makine Mühendisliği                   |
| Prof. Dr. Refail KASIMBEYLİ      | Eskişehir Teknik Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği    |
| Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ      | Selçuk Üniversitesi / Fizik                              |
| Prof. Dr. Yaşar KİBİCİ           | Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Jeoloji Mühendisliği |
| Prof. Dr. İsmail KOCAÇALIŞKAN    | Yıldız Teknik Üniversitesi / Moleküler Biy. ve Genetik   |
| Prof. Dr. Mahmut KOÇAK           | Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Mat.-Bilgisayar       |
| Prof. Dr. Muhsin KONUK           | Üsküdar Üniversitesi / Moleküler Biy. ve Genetik         |
| Prof. Dr. Mustafa KURU           | Başkent Üniversitesi / Moleküler Biy. ve Genetik         |
| Prof. Dr. Ömer İrfan KÜFREVİOĞLU | Atatürk Üniversitesi / Biyokimya                         |
| Prof. Dr. Halim MUTLU            | Ankara Üniversitesi / Jeoloji Mühendisliği               |
| Prof. Dr. Ekrem SAVAŞ            | İstanbul Ticaret Üniversitesi / Matematik                |
| Prof. Dr. Murat TANIŞLI          | Eskişehir Teknik Üniversitesi / Fizik                    |
| Prof. Dr. Ali Rehber TÜRKER      | Gazi Üniversitesi / Kimya                                |
| Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN        | Giresun Üniversitesi / Biyoloji                          |
| Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT       | İstanbul Medeniyet Üniversitesi / Fizik Mühendisliği     |
| Prof. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU         | Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği   |
| Prof. Dr. Nurettin YAYLI         | Karadeniz Teknik Üniversitesi / Eczacılık                |
| Prof. Dr. Yusuf YAYLI            | Ankara Üniversitesi / Matematik                          |
| Prof. Dr. Elçin YUSUFOĞLU        | Uşak Üniversitesi / Matematik                            |
| Prof. Dr. Hüseyin Serdar YÜCESU  | Gazi Üniversitesi / Otomotiv Mühendisliği                |
| Prof. Dr. Mehmet Tevfik ZEYREK   | Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Fizik                    |



**JOURNAL OF SCIENTIFIC REPORTS-B**

**İÇİNDEKİLER / CONTENTS**

**ARAŞTIRMA MAKALELERİ / RESEARCH ARTICLES**

- Soğuk Su Yönlendirme Plastiğinin Termosifon Performansına Etkisi*** 1-8  
*The Effect of Inlet Pipe on Performance of Vertical Electrical Storage Water Heater*  
Aytaç BİÇER, Aydoğan KAYA
- Katkılandırılmış (Eu, Dy, Sb, Co, Tb) Baryum Titanat Seramiklerinin (BatiO<sub>3</sub>) Dielektrik ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi*** 9-28  
*Investigation on Dielectric and Magnetic Properties of Doped (Eu, Dy, Sb, Co, Tb)Barium Titanate Ceramics*  
Hazal GERGEROĞLU, M.Faruk EBEOĞLUGİL, Eda TAŞÇI
- Afyonkarahisar İli Dinar Bölgesi için Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminde Yapay Sinir Ağları Modelinin Uygulanması*** 29-38  
*The Application of Artificial Neural Network Model in Electricity Generation from Wind Power for Dinar Region of Afyonkarahisar Province*  
Ali Hakan ÇOLAKER, Serdar ÖZYÖN, Ayhan GÜN
- Ultrasonik Ses Dalgalarının Kömür Tane Boyutu Üzerine Etkisinin Araştırılması*** 39-54  
*Investigation of the Effects of Ultrasonic Energy on Coal Particle Size*  
Uğur DEMİR
- Su Yollu Yapıya Dik ve Paralel Kesilmiş Travertenlerde Kapiler Su Emme ve Basınç Dayanımı Özelliklerinin Anizotropik Değişimlerinin İncelenmesi*** 55-67  
*Anisotropic Changes of Capillary Water Absorption and Compressive Strength Parameters in 'Vein Cut' and 'Cross Cut' Shaped Travertines*  
İbrahim ÇOBANOĞLU



## SOĞUK SU YÖNLENDİRME PLASTİĞİNİN TERMOSİFON PERFORMANSINA ETKİSİ

Aytaç Biçer<sup>1\*</sup>, Aydoğan Kaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Türk Demirdöküm Fabrikaları A.Ş. , Bozüyük 11300, Bilecik, [aytac.bicer@vaillant-group.com](mailto:aytac.bicer@vaillant-group.com), ORCID: 0000-0003-2285-8385

<sup>2</sup> Türk Demirdöküm Fabrikaları A.Ş. , Bozüyük 11300, Bilecik, [aydogan.kaya@vaillant-group.com](mailto:aydogan.kaya@vaillant-group.com), ORCID: 0000-0003-2120-0426

*Geliş Tarihi: 05.08.2019*

*Kabul Tarihi: 15.09.2020*

### ÖZ

Dikey elektrikli su ısıtıcılarda kullanılan soğuk su yönlendirme plastiğinin ürün performansına etkisi incelenerek, performans testi ile doğrulanmıştır. Kesikli, eğimli, çapraz ve yarıklı şekilde isimlendirilen dört farklı soğuk su yönlendirme plastiği 65 litre termosifon kullanılarak 10 L/dk debi ile test edilmiştir. Soğuk su yönlendirme plastiği elektrikli termosifon içerisine dikey olarak montajlanmıştır. Yönlendirme plastikleri 3D yazıcı ile termal şok direnci yüksek plastikten üretilerek performans testi yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda soğuk su yönlendirme plastiğinin elektrikli su ısıtıcısı ürünlerinin performansına etki ettiği görülmüştür. Test çalışmalarının sonucunda en iyi performans değerini çapraz soğuk su yönlendirme plastiği göstermiştir. Kesikli ve eğimli soğuk su yönlendirme plastiği yakın bir değere sahiptir.

**Anahtar kelimeler:** *Termosifon, Plastik, Isıtıcı, Performans, Isı*

### THE EFFECT OF INLET PIPE ON PERFORMANCE OF VERTICAL ELECTRICAL STORAGE WATER HEATER

#### ABSTRACT

In this study, the effect of cold water diverter pipe on performance of vertical electrical storage water heater (ESWH) have been investigated experimentally that is verified with performance tests. For this purpose, four different inlet pipes which are called dotted line, slope, cross and slotted, were designed and tested in 65 liter ESWH with 10 l/min flow rate. Cold water pipe were assembled with vertical in ESWH. Cold water inlet pipe were produced in 3D printer by using high thermal shock resistance material and performance tests were conducted. According to the test results, it has been observed that cold water inlet pipe effect to performance of ESWH. The results show an excellent performance for the cross inlet pipe. Slope and cross cold water diverter pipe has a close effect to this value.

**Keywords:** *Storage, Plastic, Heater, Performance, Heat*

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, sonlu fosil yakıt rezervleri hava kirliliği, ozon tabakası, olumsuz çevresel etkiler ve küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler kendi enerjilerini üretmektedir. Olumsuz çevresel etkiler ülkeleri enerji üzerine uygulanabilir strateji yapmasına zorlamaktadır. Enerji kaynaklarını kontrol etmek ve yönetmek çok önemlidir. Bu kaynaklar ülke ekonomisini sürdürülebilir kalkınmayı ve ekonomik büyümeye sebep olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım ve az enerji tüketimine yönelik çalışmalar artmaktadır [1].

Son yüzyılda teknolojiye birçok gelişmeler olmuştur. Bu gelişmeler sonucunda elektrik ve enerji tüketimi artmaktadır. İnsanların ısınmak ve sıcak su ihtiyacını karşılamak için fosil yakıtlı ürünler veya elektrikli ısıtıcılar kullanılmaktadır. Güneş enerjili solar su ısıtıcıları yaygın olarak sıcak ülkelerde kullanılmaktadır [2]. Sıcaklığın yeterli olmadığı bölgelerde fosil yakıt ile çalışan kombi, şofben ve elektrikli termosifon ürünleri tercih edilmektedir. Özellikle gaz tüketiminin olmadığı bölgelerde tercih edilen termosifon ürünleri elektrik enerjisi tüketmektedir. Avrupa'da 2015 Eylül ayında devreye giren pr50440 ErP standardı gereği, belli bir enerji sınıfının altındaki termosifon ürünleri üretilmemektedir ve standart termosifon ürünlerinin performansının artırılması konusunda çalışmaları tetiklemektedir. Dünya üzerindeki birçok ülke de yaygın olarak termosifon kullanılmaktadır [3].

Termosifon, içine aldığı suyu istenilen sıcaklığa kadar ısıtan ve bu sıcaklıkta sabit kalmasını sağlayan bir elektrikli cihazdır. Depo içindeki suyun ısıtılması bütün elektrikli ısıtıcılarda olduğu gibi bir rezistans (ısıtıcı) ile yapılır. Termosifonların su depoları 20 ile 500 litre arasında çeşitli büyüklüklerde yapılır [4].

Termosifon ürünleri genellikle 60 ve 65 °C'de ayarlanarak kullanılmaktadır. Bu sıcaklıklarda daha fazla sıcak su temin edileceği algısı vardır. Termosifonların bir soğuk su girişi ve bir de sıcak su çıkışı vardır. Musluk açıldığında soğuk su girişinden termosifon içine su dolar. Termostatın düğmesi istenilen sıcaklığa kadar çevrilerek rezistansı devreye sokar. Ayarlanan ısı derecesine ulaştığında ise termostat rezistansa giden enerjiyi keser. Sıcak su çıkışından ise ısınmış su dışarı alınarak kullanılır [5]. Yüksek sıcaklığa ayarlanması durumunda soğuk su ile sıcak su karışımının azalmasıyla dengelenmektedir. Sıcak su çekilirken, soğuk su depolanarak karışımın azalması ile sonuçlanmaktadır [3].

Ürün içerisine giren soğuk su ile karışım probleminin çözülmesi için seri bağlanmış iki adet termosifon önerilmektedir [6]. Fakat Minguez [6]'in önermiş olduğu sistem estetik açıdan ve tek depo ısıtıcılı ürünün daha kompakt olmasından dolayı tercih edilmemiştir.

50 litre termosifonda ısıtıcı pozisyonunun performansa etkisi araştırılmıştır. Sezai ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 40 °C'lik 50 L sıcak su, 6 dakika boyunca duş almak için yeterlidir. Türk Standartlarına göre bir mutfak lavabosunda 5 dakika kullanım için 55 °C'lik sıcak su yeterlidir. Ancak, daha fazla miktarda sıcak su gerekiyorsa, ekstra ısıtıcının açılması gerekmektedir [7].

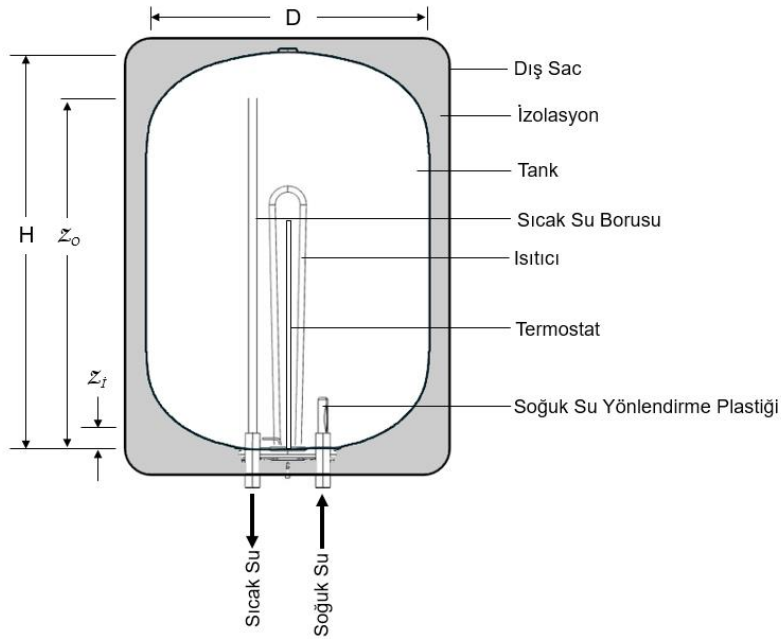
Hegazy ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada soğuk su yönlendirme plastiği tasarımının termosifon performansına etkisi araştırılmıştır. 50 lt termosifon ürün içerisinde farklı tasarımlara sahip soğuk su plastikleri yatay olarak montajlanarak 5 ve 10 lt/dk debi ile test edilmiştir. Yapılan test sonucunda soğuk su yönlendirme plastiğinin termosifon performansına etki ettiği ve yarıklı soğuk su



yönlendirme plastiğinin en yüksek performansı sergilediği görülmüştür [8]. Yapılan bu çalışmada yaygın olarak kullanılan 65 litre kapasiteli termosifon üzerindeki soğuk su plastiği tasarımının dikey olarak montajlanarak etkisi araştırılmıştır.

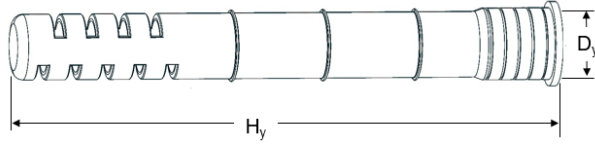
## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve DEĞERLENDİRME

Avrupa ve Türkiye’de kullanılan dikey termosifonlar farklı kapasitelerde yer almaktadır. En yaygın biçimde kullanılan termosifon kapasiteleri 50 L, 65 L, 80 L, 100 L ve 120 L’dir. Termosifon ürünlerinde soğuk su yönlendirme plastiğinin performansına etkisini görmek için 65 litre termosifon ürünü kullanılmıştır. Şekil 1’de şematik olarak termosifon yapısı gösterilmiştir. Termosifon tankının yüksekliği  $H=60$  cm ve çapı  $D=40$ cm’dir. Termosifon tankının iç yüzeyi emaye kaplı ve 1.8 mm kalınlığına sahip sac metalden yapılmaktadır. Sıcak su paslanmaz borusunun kazan içerisindeki yüksekliği  $Z_0=58,4$  cm, tank üst bölgesinde  $(H-Z_0)= 1,6$  cm boşluk kalmaktadır. Tank ile dış metal sac arasında 3-5 cm aralığında poliüretan ısı yalıtım malzemesi kullanılmıştır.



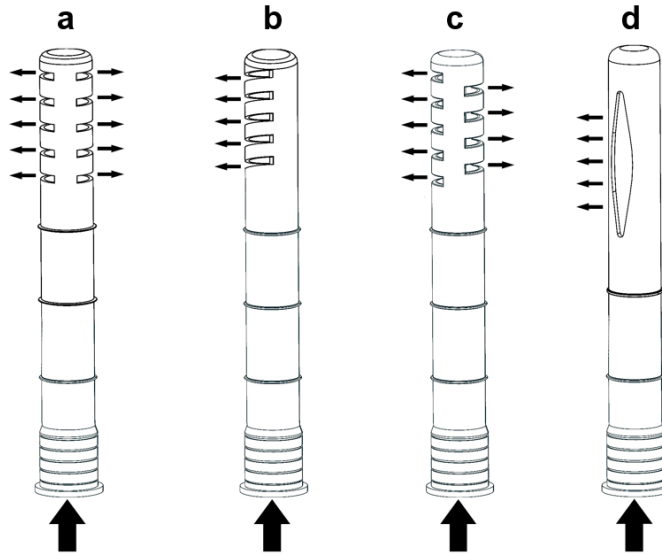
**Şekil 1.** Termosifon ürününün şematik olarak gösterimi.

Dört farklı soğuk su plastiği dikey bir şekilde  $D_b=15,6$  mm çapında ve  $H_b= 10$  cm boyunda metal borunun içerisine montaj yapılmıştır. Bütün tasarımların çıkış su alt bölgesi ile kazanın alt bölgesi arasındaki mesafe  $Z_t = 4$  cm’dir. Yönlendirme plastik tasarımlarının hepsinin iç çapı  $D_y=1,34$  cm ve boyu  $H_y= 13,5$  cm’dir (Şekil 2).



**Şekil 2.** Soğuk su yönlendirme plastiğinin şematik olarak gösterimi.

Dört farklı soğuk su yönlendirme plastiği tasarımları Şekil 3’de gösterilmiştir. Su yönlendirme plastikleri infoTron Dimension 1200es model 3D yazıcı ile oluşturulmuştur. Şekil 3a’da gösterilen kesikli su yönlendirme plastiği akış alanı 315,8 mm<sup>2</sup>, şekil 3b’de eğimli su yönlendirme plastiği akış alanı 230,0 mm<sup>2</sup>, şekil 3c’de çapraz su yönlendirme plastiği akış alanı 284,2 mm<sup>2</sup> ve şekil 3d’de yarıklı su yönlendirme plastiği akış alanı 197,4 mm<sup>2</sup>’dir.



**Şekil 3.** Test edilen soğuk su yönlendirme plastikleri tasarımı a) kesikli, b) eğimli, c) çapraz, d) yarıklı.

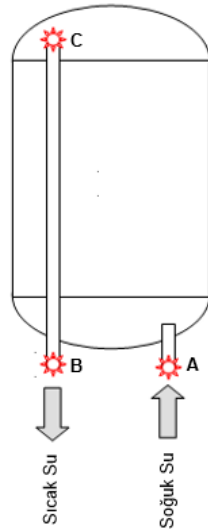
Bütün testler 1800 watt güç ve 384 mm yüksekliğine sahip paslanmaz ısıtıcı ile test edilmiştir. Termostat, kazanın alt bölgesine olan mesafesi bütün testlerde 425 mm’dir.

### 3. TEST PROSEDÜRÜ

#### 3.1. Performans Testi

Çalışmalara başlamadan önce testin etkilenmemesi için bütün testler oda sıcaklığı 20 °C olarak hazırlanan laboratuvarında yapılmıştır. Bütün ölçümler Grantt 2020 marka dataloger ile yapılmıştır. 65 litre su deposuna sahip termosifon test standına asılarak A,B ve C noktasından ölçümler alınmıştır (Şekil 4). A noktasından giriş su sıcaklığı, B noktasından çıkış su sıcaklığı ve C noktası kazanın içerisindeki su sıcaklığını göstermektedir.

Performans testi için kazan içerisine 20 °C sıcaklık ve 10 lt/dk debi olacak şekilde çiller yardımı ile su doldurulmuştur. Kazan içerisindeki su sıcaklığı homojen bir şekilde 65 °C'ye ulaşıldıktan sonra 60 dakika sabit sıcaklıkta bekletilmiştir. Her bir tasarım için 10 lt/dk ile sıcak su çıkışı başlatılarak kazandan çıkan su sıcaklığının 20 °C'ye düşmesine kadar olan süre ölçülmüştür. Süre ile çıkan su debisi çarpılması durumunda her bir tasarım için çıkan su miktarı ölçülerek not edilmiştir.



**Şekil 4.** Kazan içerisinden ölçüm alınan noktalar.

### 3.2. 24 Saatlik Isı Kaybı Testi

24 saat ısı kayıp testleri her tip soğuk su yönlendirme plastiği ile yapılmıştır. TS standardına göre termosifon ürünü 20 °C' soğuk su doldurulur. Termosifonun elektrik tüketimi ve su sıcaklığı kararlı duruma ulaşıncaya kadar açık bırakılmıştır. Termostatın devre dışına alınmasında başlama ve bitişte  $t_1$  (saat) sürede tüketilen  $E_1$  enerjisi 48 saat olarak ölçülmüştür. Termostatın her devreye alınmasındaki su sıcaklığı  $\theta_{Ei}$  ve termostatın her devre dışı bırakıldığındaki su sıcaklığı  $\theta_{Ai}$  olarak ölçülmüştür. Yapılan deneylerin süresi  $D$ , ürün kapasitesi  $C_A$ , ortam sıcaklığı  $\theta_{amb}$  ve 24 saatlik enerji tüketimi  $E$  olarak gösterilmiştir.

24 saatlik enerji tüketimi  $E$ ,

$$E = \frac{E_1 \cdot 24}{t_1} \quad (1)$$

Ortalama su sıcaklığı  $\theta_M$ ,

$$\theta_m = \frac{1}{D} \sum_i \frac{\theta_{Ai} + \theta_{Ei}}{2} (t_{Ai} - t_{Ei}) \quad (2)$$

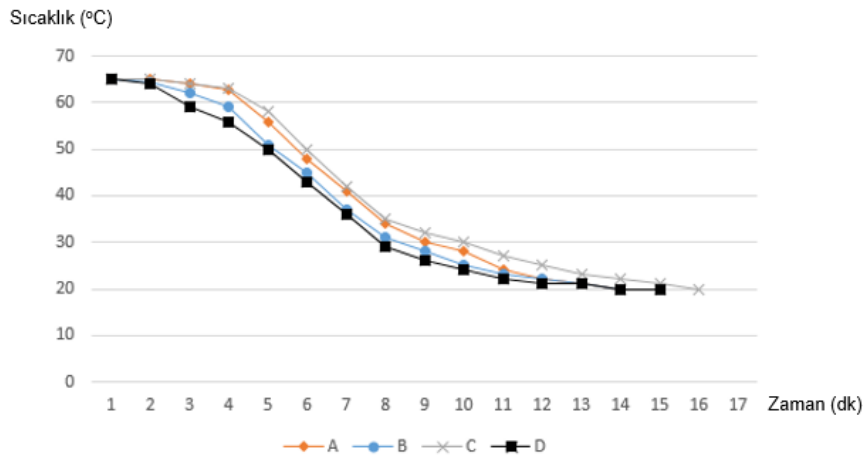
24 saatlik bekleme kaybı  $Q_{pr}$ ,

$$Q_{pr} = \frac{45}{\theta_M - \theta_{amb}} \cdot E + \frac{1,16 \cdot C_A \cdot (\theta_{A1} - \theta_{An})}{1000} \quad (3)$$

olarak ölçülmektedir.  $Q_{pr}$  değeri 24 saat 45K'lik sıcaklık artışına bağlı olarak ifade edilir [9].

#### 4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Dört farklı tasarıma yapılan performans test sonucuna göre 65 °C'den kesikli su yönlendirme plastiği 810 saniyede, eğimli tasarım 834 saniye, çapraz tasarım 948 saniye ve yarıklı tasarım 774 saniyede 20 °C'ye ulaşmıştır (Şekil 5).



**Şekil 5.** Soğuk su yönlendirme plastiklerine ait performans test sonucu a) kesikli, b) eğimli, c) çapraz, d) yarıklı.

$\Delta T=45$  °C'ye göre alınan su miktarı en yüksek çapraz su yönlendirme plastik tasarımında 158 lt ölçülmüştür. Eğimli ve kesikli su yönlendirme plastik tasarımı yakın değerlerde sırasıyla 135 lt ve 130 lt ölçülmüştür. Yarıklı su yönlendirme plastik tasarımı ise 129 litre olarak ölçülmüştür (Tablo 1).

**Çizelge 1.**  $\Delta T=45$  °C alınan su miktarı.

| TASARIM | $\Delta T=45$ °C SÜRE (sn) | DEBİ (lt/dk) | ALINAN SICAK SU MİKTARI (lt) |
|---------|----------------------------|--------------|------------------------------|
| Kesikli | 810                        | 10           | 135                          |
| Eğimli  | 834                        | 10           | 139                          |
| Çapraz  | 948                        | 10           | 158                          |
| Yarıklı | 774                        | 10           | 129                          |

24 saatlik ısı kaybı testi içerisinde her test 60 saat olarak yapılmıştır. Farklı soğuk su plastik tasarımına sahip 65 litre termosifon ürünü oda sıcaklığı 20 °C derece olan laboratuvarında test edilmiştir. 24 saatlik enerji tüketimi (1) nolu formüle göre en düşük çapraz plastik tasarımında 0.72 kW olarak ölçülmüştür (Tablo 2).

**Tablo 2.** E – 24 saatlik enerji tüketimi.

| TASARIM | E <sub>1</sub> - Test süresince harcanan enerji (kw) | t <sub>1</sub> – Test süresi (h) | E – 24 saatlik enerji tüketimi (kW) |
|---------|------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Kesikli | 1.98                                                 | 63                               | 0.75                                |
| Eğimli  | 2.02                                                 | 63                               | 0.77                                |
| Çapraz  | 1.89                                                 | 63                               | 0.72                                |
| Yarıklı | 2.11                                                 | 63                               | 0.80                                |

24 saatlik ısı kaybı testi içerisinde her test 60 saat olarak yapılmıştır. 24 saatlik bekleme kaybı (1) ve (2) nolu formüle göre en düşük çapraz plastik tasarımında 0.80 kWh olarak ölçülmüştür (Tablo 3). Diğer tasarımların sonuçları Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Q<sub>pr</sub> – 24 saatlik bekleme kaybı.

| TASARIM | E – 24 saatlik enerji tüketimi (kW) | D – Testlerin Süresi (h) | θ <sub>M</sub> – Ortalama su sıcaklığı (°C) | θ <sub>A1</sub> – Başlangıç Sıcaklığı (°C) | θ <sub>An</sub> – Bitiş Sıcaklığı (°C) | Q <sub>pr</sub> – 24 saat bekleme kaybı (kWh) |
|---------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Kesikli | 0.75                                | 60                       | 63                                          | 67.3                                       | 66.7                                   | 0.84                                          |
| Eğimli  | 0.77                                | 59                       | 63                                          | 66.9                                       | 66.1                                   | 0.85                                          |
| Çapraz  | 0.72                                | 60                       | 63                                          | 67.0                                       | 66.4                                   | 0.80                                          |
| Yarıklı | 0.80                                | 60                       | 63                                          | 67.5                                       | 66.6                                   | 0.91                                          |

Sonuçlara göre soğuk su yönlendirme plastik tasarımı termosifon ürünlerinin performansını etkilemektedir. Çapraz şekilde tasarlanan soğuk su yönlendirme plastiği ΔT=45 °C sıcaklık artışında 158 lt sıcak su temin edildiğinden dolayı en yüksek performansa ve 0.72 kW ile en düşük enerji tüketimine sahip olduğu görülmüştür.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılmasında laboratuvar imkanlarından yararlanmamızda yardımcı olan Türk Demirdöküm Fabrikasına, çalışanlarından İlker Çekiç ve Yasemin Çoşkun’a teşekkür ederiz.

#### KAYNAKÇA

- [1] Benli, H., (2015), Potential application of solar water heaters for hot water production in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 99-109
- [2] L. J. Y. B. Wei H, (2014), Cost-benefit comparison between domestic solar water heater (DSHW) and building integrated photovoltaic (BIPV) systems for households in urban China, *Applied Energy*, cilt 126, pp. 47-55
- [3] Adel H.A. and Diab M.,(2002), Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters,» *Applied Energy*, cilt 71, pp. 287-306
- [4] SA, H.,(1989), Sizing a storage type water heating system,» *ASHRAE Journal*, cilt 31, pp. 35-40,
- [5] MEGEP Elektrikli Su Isıtıcılar (522EE0099)
- [6] JM., (1987), International Journal of Energy Research,» 11:145
- [7] Sezai, L. A. U. A. H. H. I.(2005), Performance improvement by using dual heaters in a storage-type domestic electric water-heater, *Applied Energy*, no. 81, p. 291–305
- [8] Hegazy, A.A., (2007), Effect of inlet design on the performance of storage-type domestic electrical water heaters,» *Applied Energy*, no. 84, pp. 1338-1355
- [9] T. S. Enstitüsü,(2006), Evlerde kullanılan depolu elektrikli su ısıtıcıları performans ölçme metotları, Türk Standart Enstitüsü





*ARAŞTIRMA MAKALESİ (Research Article)*

**KATKILANDIRILMIŞ (Eu, Dy, Sb, Co, Tb) BARYUM TİTANAT SERAMİKLERİNİN  
(BaTiO<sub>3</sub>) DİELEKTRİK VE MANYETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Hazal GERGEROĞLU<sup>1,\*</sup>, M.Faruk EBEOĞLUGİL<sup>2</sup>, Eda TAŞÇI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanobilim ve Nanomühendislik Bölümü, İzmir,  
[hazal.gergeroglu@ogr.deu.edu.tr](mailto: hazal.gergeroglu@ogr.deu.edu.tr), ORCID: 0000-0001-8369-9221

<sup>2</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İzmir,  
[faruk.ebeoglugil@deu.edu.tr](mailto: faruk.ebeoglugil@deu.edu.tr), ORCID: 0000-0003-4979-7017

<sup>3</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Bölümü,  
Kütahya, [eda.tasci@dpu.edu.tr](mailto: eda.tasci@dpu.edu.tr), ORCID: 0000-0003-3346-8833

*Geliş Tarihi: 27.08.2019*

*Kabul Tarihi: 16.07.2020*

**ÖZ**

Bu çalışmada üstün piezoelektrik ve ferroelektrik özellik gösteren Baryum Titanat (BaTiO<sub>3</sub>) seramik tozları karıştırılmış oksit yöntemi ile üretilmiştir. Daha sonra eşit mol yüzdesinde Evropiyum (Eu), Disprosiyum (Dy), Antimon (Sb), Kobalt (Co) ve Terbiyum (Tb) elementleri katkı malzemesi olarak kullanılmış, katkılı BaTiO<sub>3</sub> seramik tozları nano ve mikro ölçekte sentezlenmiştir. Bu toz karışımlarına soğuk pres yöntemiyle şekil verildikten sonra sinterleme işlemi uygulanmıştır. SEM, XRD ve XPS karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir, kapasitans ve manyetometri ölçümleri yapılmıştır. Sonuç olarak, oda sıcaklığında yarı iletken davranışa ve ferroelektrik özelliğe sahip nano boyutlu katkılı ve katkısız BaTiO<sub>3</sub> seramik tozlar elde edilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen karakterizasyon sonuçlarında kullanılan katkı malzemeleri içinde en uygun katkı malzemesi Sb olarak tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** *Baryum titanat, ferroelektrik, katkılandırma, nano-seramikler*

**INVESTIGATION ON DIELECTRIC AND MAGNETIC PROPERTIES OF DOPED (Eu, Dy, Sb, Co, Tb) BARIUM TITANATE CERAMICS**

**ABSTRACT**

In this study, barium titanate (BaTiO<sub>3</sub>) ceramic powders which have superior piezoelectric and ferroelectric properties were produced by mixed oxide method. Europium (Eu), Dysprosium (Dy), Antimony (Sb), Cobalt (Co) and Terbium (Tb) elements are used as dopant material in equal mole percent, and doped BaTiO<sub>3</sub> ceramic powders were synthesized on nano and micro scale. These powder mixtures were shaped by cold press method and then sintered. SEM, XRD characterizations, and capacitance, and magnetometry measurements were performed. As a result, nano-sized doped and undoped BaTiO<sub>3</sub> ceramic powders having semiconductor behavior and ferroelectric properties were

obtained at room temperature. In addition, the most suitable dopant material was determined as Sb as a result of the characterization results.

**Keywords:** Barium titanate, ferroelectric, doping, nano-ceramics

## 1.GİRİŞ

Elektronik cihazların minyatürleştirilmesindeki araştırmalar, çeşitli nano ve mikro ölçekli malzemelerin üretimine odaklanmaktadır[1]. Ferroelektrik bir malzeme olan BaTiO<sub>3</sub>(BT) yüksek dielektrik sabiti, yüksek piezoelektrik katsayısı, nispeten düşük dielektrik kaybı, yüksek direnç gibi üstün özellikleri nedeniyle son on yılda önemli ölçüde dikkat çekmiştir [1,2]. Ayrıca BT'nin perovskit yapısı, kristal kafeste farklı yarıçaplı iyonları barındırma yeteneğine sahiptir. Çeşitli iyonlarla doping yapılması, BT'nin yapı ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesi ile elektronikteki uygulamalarının genişletilmesini sağlamaktadır [3].

BT, oda sıcaklığında tetragonal perovskit yapıya sahiptir ve esasen sahip olduğu ferroelektrik özellikleri kristal kafes yapısı ile kazanmıştır. Ek olarak 130°C Curie sıcaklığında, paraelektrik faza geçiş yapmaktadır. Ancak katılanmamış BT'nin elektriksel açıdan oda sıcaklığında yalıtkan olduğu bilinmektedir. BT'de elektriksel mekanizma, üretilen elektronların Ti<sup>IV+</sup>'ü Ti<sup>III+</sup>'e düşürmesi ve akabinde genel formülü BaTi<sub>1-y</sub><sup>IV+</sup>Ti<sub>y</sub><sup>III+</sup>O<sub>3-y</sub> olan koyu renkli, n tipi yarı iletken malzemenin üretilmesi ile gerçekleşmektedir. Az miktarda katkı ilavesi (<%1) elektronik kompanzasyon mekanizması ile çalışan n tipi yarı iletkenliği de indüklemektedir [4].

Son yıllarda, nadir toprak elementleri ile doplanmış BT dielektrik seramiklerinde dikkat çekici iki keşif olmuştur; (1) Ti boşluğunun meydana gelmesiyle, baryum (Ba) alanlarının Lantan (La) ile yer değişimi nedeniyle Curie tepe noktasının düşük sıcaklığa doğru belirgin bir hızla kayması ve nihai (Ba<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>)Ti<sub>1-x/4</sub>O<sub>3</sub> seramiklerinde şaşırtıcı derecede yüksek dielektrik sabiti elde edilmesidir. Ancak, Curie zirvesi oda sıcaklığına ulaştığında çok keskin ve dardır. Ayrıca ilk aşamadaki geçiş davranışını göstermektedir; (2) Seryumun (Ce) titanyum (Ti) bölgelerinde eşdeğer ikame edilmesi, "gevşetici" tipindeki Ba (Ti<sub>1-y</sub>Ce<sub>y</sub>)O<sub>3</sub> seramiklerinde Curie tepe noktasının genişlemesiyle sonuçlanmaktadır [5]. Öte yandan katkı malzemesi olarak geniş çapta kullanılan diğer nadir toprak iyonlarından hafif amfoterik davranışa sahip Neodimyum (Nd) [6,7], Samaryum (Sm) [8–10], Eu [11], ve Gadolinyum (Gd)'un [12] da donör olarak görev aldığı ve BT'nin dielektrik sabiti ile geçirgenliğini arttırmada, Curie geçiş sıcaklığını düşürmede aktif bir rol oynadığı bildirilmiştir. Ek olarak amfoterik davranış sergileyen ara bölge nadir toprak elementleri Dy [13–15], Holmiyum (Ho) [16] ve Erbiyum (Er) [17–19] ile daha az bulunan nadir toprak elementleri İtterbiyum (Yb) [18,20] ve Lutesyum (Lu) [21] (Ti bölgelerinde alıcı görevi üstlenen) iyonlarının BT seramiklerinde katkı malzemesi olarak kullanıldığı çok sayıda araştırma yürütülmektedir. Sonuç olarak, katkı ilavesi ile BT'nin elektriksel ve manyetik özelliklerinin uygulanan katkı miktarına, katkının kimyasal özelliklerine bağlı olarak gelecek vaat eden ve çevre dostu bir araştırma alanı olduğu bildirilmektedir [21,22].

Öte yandan basit oksitler, yalnızca elementin veya metalin normal değerinin izin verdiği miktarda oksijen atomu taşıyan oksitlerdir. İki basit oksit birleştirildiğinde karışık oksitler elde edilmektedir. İki basit oksitin bileşenleri aynı element veya farklı elementlerden olabilir. Ek olarak farklı elementler veya metallerin oksitleri birleştirildiğinde de karıştırılmış oksitler elde edilmektedir [23,24]. Örneğin ilmenit (FeTiO<sub>3</sub>) demir oksit (FeO) ve titanyum oksit (TiO<sub>2</sub>) karışımıdır [25]. Bir başka örnek olarak stronsiyum oksit (SrO) ve TiO<sub>2</sub> karışımı olan stronsiyum titanat (SrTiO<sub>3</sub>) verilebilir [26]. Geniş bir

yelpazede kolay, basit ve ucuz bir üretim yöntemi olduğu için karıştırılmış oksit metodu oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, katkı malzemelerinin yapıda meydana getirdiği değişimleri tutarlı şekilde incelemek ve analiz etmek amacıyla her bir katkı malzemesi (Eu, Dy, Sb, Co ve Tb) eşit mol yüzdesi ile yapıya dahil edilerek katkılı BT tozları karıştırılmış oksit yöntemiyle nano ve mikron ölçekte başarılı bir şekilde üretilmiştir. BT yapısında katkı malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılan Eu, Dy ve Tb ile diğer katkı malzemeleri Co ve Sb'nin BT perovskit kafes yapısına etkisi, morfolojik özelliklerdeki değişimler, elektriksel özelliklerde meydana gelen modifikasyonlar ile manyetik özellikler her bir katkı malzemesi için karakterize edilmiş ve titizlikle incelenmiştir. Bununla birlikte, bahsedildiği üzere, nadir toprak elementleri ile doplamanın BT'nin elektriksel ve manyetik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaya yönelik çok sayıda çalışma yürütülmüştür. Ancak bildiğimiz kadarıyla, bu katkı malzemeleri ile BT arasındaki sinerjinin bir arada değerlendirildiği ve en iyi uyumluluğu gösteren dopant malzemesinin araştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmanın en önemli amacı morfolojik, kimyasal, yapısal, elektriksel ve manyetik özellikler açısından en iyi dopant malzemesini belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen karakterizasyonlar neticesinde oda sıcaklığı civarında yüksek geçirgenliğe sahip ferroelektrik BT seramik tozları için Eu, Dy, Sb, Co ve Tb arasında en uygun katkı malzemesi tespit edilmiştir.

## 2. DENEYSEL METOT

### 2.1. Malzemeler

Bu çalışmada, katkılı ve katkısız BT üretimi için kullanılan baryum asetat ( $Ba(C_2H_3O_2)_2$ ), titanyum izopropoksit ( $C_{12}H_{28}O_4Ti$ ) ve katkı malzemelerinin (Eu, Dy, Sb, Co ve Tb) özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.** Kullanılan materyallerin özellikleri.

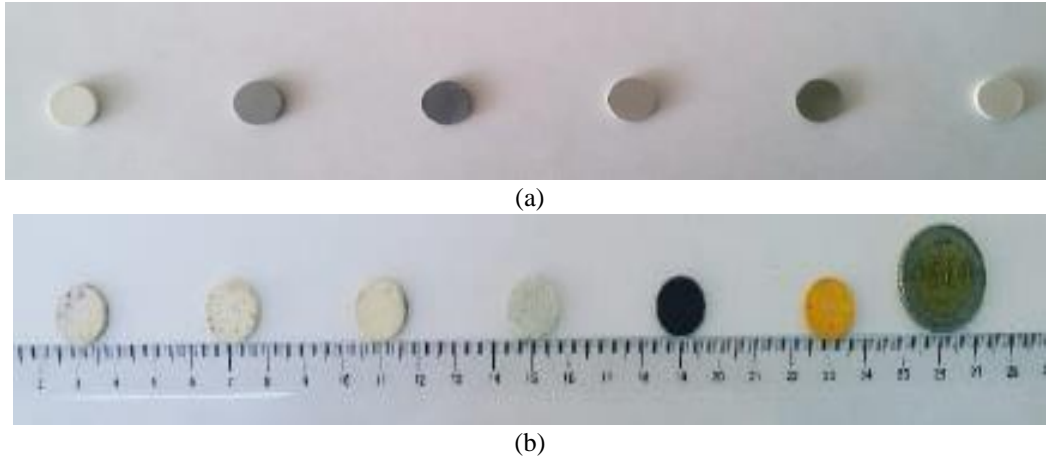
| Malzeme                   | Saflık derecesi | Ürün kodu  | Tedarikçi firma |
|---------------------------|-----------------|------------|-----------------|
| Baryum asetat             | $\geq\%99.9$    | 32305      | Sigma-Aldrich   |
| Titanyum(IV) izopropoksit | $\%97$          | 205273     | Sigma-Aldrich   |
| Eu                        | $\%99.9$        | GF10519084 | Aldrich         |
| Dy                        | $\%99.9$        | GF87801723 | Aldrich         |
| Sb                        | $\%99.999$      | GF14918014 | Aldrich         |
| Co                        | $\geq\%99.9$    | 266647     | Sigma-Aldrich   |
| Tb                        | $\%99.9$        | GF21766552 | Aldrich         |

### 2.2. Katkılı ve Katkısız BT Seramiklerinin Üretimi

Uygun miktarları hesaplanan baryum asetat ( $Ba(C_2H_3O_2)_2$ ) ve titanyum izopropoksit ( $C_{12}H_{28}O_4Ti$ ) hassas terazide tartıldıktan sonra toplam hacme uygun agat havana alınmış ve katı oksit karıştırma yöntemi ile 12 saatten az olmamak koşulu ile karıştırılmıştır. Daha sonra, her bir örnekteki katkı malzemesinin BT'nin özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla  $Ba_{1-x}TiEu_xTiO_3$ ,  $Ba_{1-\frac{x}{2}}Ti_{1-\frac{x}{2}}Dy_xO_3$ ,  $Ba_{1-x}TiSb_xO_3$ ,  $BaTi_{1-x}Co_xO_3$ ,  $Ba_{1-\frac{x}{2}}Ti_{1-\frac{x}{2}}Tb_xO_3$  ( $x=0.1$ ) formülasyonları kullanılmış, katkılı numuneler ezilerek kırma ve karıştırma işlemleri uygulanarak hazırlanmıştır.

Elde edilen katkılı seramik tozlar (BT/Eu, BT/Dy, BT/Sb, BT/Co, BT/Tb) ile saf BT tozları hassas terazide birer gram tartılmış, hidrolik preste 7 tonluk kuvvetle 5 dakika boyunca preslenmiştir.

Akabinde örnekler soğuk izostatik preste 15 dakika boyunca 300 Bar basınç uygulanmıştır. Elde edilen örnekler Şekil 1a'da gösterilmiştir. Daha sonra 1200°C'lik fırında, hava atmosferinde, bir saat sinterleme işlemi gören örneklerin Şekil 1b'de sinterleme işleminden sonraki görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 1.** Preslenmiş numunelerin görüntüsü (her iki fotoğraf için de soldan sağa sırasıyla, saf BT, BT/Eu, BT/Dy, BT/Sb, BT/Co, BT/Tb); (a) Sinterleme işleminden önce, (b) Sinterleme işleminden sonra.

### 2.3. Malzemelerin Karakterizasyonları

Numunelerin faz tanımlaması ve kristal yapıları, 45 kV voltaj ve 44 mA akım değerleri ile çalışan ve Cu-K $\alpha$  model (1.5405 Å) Thermo Scientific ARL X-ışını difraktometresi (XRD) ile gerçekleştirilmiştir. XRD verileri 1°/dk hızında 0.02 derecelik adımlarla 20° $\leq$ 2 $\theta$  $\leq$ 60° aralığında kaydedilmiştir. Katkılı ve katkısız nano ölçekli BT seramik tozların SEM görüntüleri, 15 kV'lık voltajda çalışan Philips XL 30S FEG taramalı elektron mikroskobu yardımıyla elde edilmiştir. Tüm örneklerin yüzey kimyasını incelemek için, monokromatik Al-K $\alpha$  (1486.7 eV) X-ışını kaynağı ve 400 nm çaplı ışın boyutuna sahip K-Alpha ekipmanlı (Thermo Scientific) X-Ray fotoelektron spektroskopisi (XPS) kullanılmıştır. Altına (4f $_{7/2}$ ) göre kalibre edilen sistemin basıncı, veri toplama süresi boyunca 5x10 $^{-10}$  mbar'ın altında tutulmuştur. Genel taramanın XPS verileri, 150 eV'lik geçiş enerjisi kullanılarak 1 eV tarama hızı ile 250 ile 1220 eV arasında gerçekleştirilmiş, Shirley yöntemi yardımıyla değerlendirilmiştir. Ek olarak her numune için elemental tarama, tek bir noktadan 20 kez tekrarlanmıştır. Ayrıca pelet haline getirilmiş katkılı ve katkısız BT örneklerin kapasitans, empedans, reel dielektrik katsayısı ve iletkenlik değerleri yüksek çözünürlüklü dielektrik analiz cihazı Novo Control, Alpha-N kullanılarak 10 $^{-1}$  Hz ila 10 $^7$  Hz aralığında frekansın bir fonksiyonu olarak oda sıcaklığında ölçülmüştür. Ek olarak ölçümler sırasında, numunelere 3 Vrms AC voltaları uygulanmıştır. Manyetik özellikler ise oda sıcaklığında, titreşimli manyetometre (VSM, Lakeshore 736, 7400 Serisi) ile maksimum 1000 Gauss alanda tespit edilmiştir. Elde edilen histeresis döngülerinden doygunluk mıknatıslılığı (Ms) ve artık mıknatıslanım (kalıcı manyetiklik) (Hc) belirlenmiştir.

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Saf halde ve sabit bir mol oranında farklı katkı malzemeleri ile üretimi gerçekleştirilen BT seramik tozlarının SEM karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. SEM görüntülerinde katkısız BT'nin, katkılılandırıldıktan sonra genel olarak tane boyutunun azaldığı sonucuna varılabilir (Şekil 2). Önceki çalışmalar [11,27–29] ile büyük bir uyum içerisinde olan bu sonuç, ortalama tane boyutu hesabıyla da desteklenmiştir. Image J programı kullanılarak, 50 farklı yerden alınan ölçüm ile hesaplanan ortalama tane boyutu Çizelge 2'de gösterilmiştir. Tane boyutu ölçümlerinde hesaplanan standart sapmanın her bir numune için ortalama tane boyutuna yakın değerlerde elde edilmesi, yoğun malzeme için gerekli olan farklı boyutlara sahip tozların elde edildiğini doğrulamaktadır.

**Çizelge 2.** Katkısız ve katkılı BT seramik tozlarının ortalama çapları.

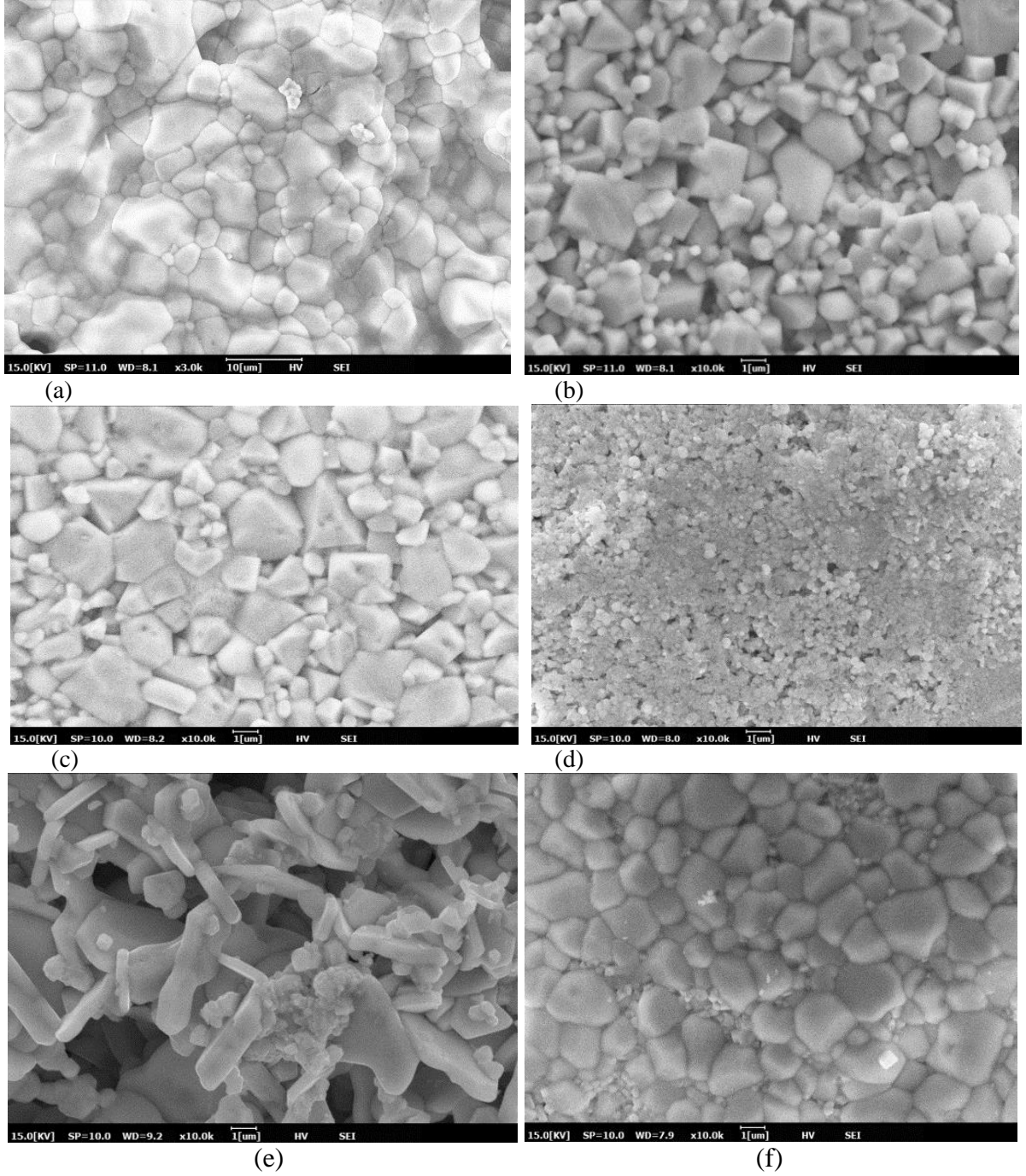
| Numune | Çap ( $\pm$ ) ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------|---------------------------------|
| BT     | $3.83 \pm 1.921$                |
| BT/Eu  | $0.90 \pm 0.454$                |
| BT/Dy  | $1.04 \pm 0.610$                |
| BT/Sb  | $0.307 \pm 0.112$               |
| BT/Co  | $0.946 \pm 0.628$               |
| BT/Tb  | $0.988 \pm 0.631$               |

Eu katkısı ile ortalama tane boyutu önemli ölçüde azalmış,  $3.83 \mu\text{m}$ 'dan  $0.90 \mu\text{m}$ 'ye düşmüştür. (Çizelge 2). Tüm katkılılandırılmış numuneler içerisinde en yüksek tane boyutları sırasıyla BT/Dy ( $1.04 \mu\text{m}$ ) ve BT/Tb ( $0.988 \mu\text{m}$ ) örneklerinde elde edilmiştir. Bunun nedeni Dy ve Tb'nin perovskit kristal kafesinin hem A hem B bölgelerinde ikame edilmesi olarak açıklanabilir (Çizelge 3).  $\text{BaTiO}_3$  perovskit kristal kafesi  $\text{TiO}_6$  oktahedronlardan oluşmaktadır ve Ba iyonları  $\text{TiO}_6$  iskeletinin geçiş boşluğunda bulunmaktadır. Sahip olduğu bu kristal kafes yapı nedeniyle BT'nin Ba (A) alanlarında herhangi bir doping iyonunun ikame edilmesinin perovskit kristal kafeste bir büzümeye yol açacağı, Ti (B) alanlarında ikame edilmesinin ise kafes genişlemesine neden olacağı önceki çalışmalarda bildirilmiştir [30]. Bu çalışmada, en düşük iyonik yarıçapa sahip olan ancak B bölgesinde ikame edilen Co dopantı içeren BT/Co örneği ( $0.946 \mu\text{m}$ ) yerine, en düşük tane boyutu A bölgesinde ikame edilen Sb dopantıyla ( $0.307 \mu\text{m}$ ) sağlanmıştır (Çizelge 2).

**Çizelge 3.** Kullanılan iyonların yarıçapları ve BT kafesindeki yerleşimi.

| İyon             | İyonik yarıçap (nm) | BT kafesinde ikame edildiği bölge |
|------------------|---------------------|-----------------------------------|
| $\text{Eu}^{+2}$ | 0.112               | A                                 |
| $\text{Dy}^{+3}$ | 0.117               | A ve B                            |
| $\text{Sb}^{+3}$ | 0.076               | A                                 |
| $\text{Co}^{+2}$ | 0.063               | B                                 |
| $\text{Tb}^{+3}$ | 0.092               | A ve B                            |





**Şekil 2.** Katkısız ve katkılı BT'nin SEM görüntüleri; (a) BT(saf), (b) BT/Eu, (c) BT/Dy, (d) BT/Sb, (e) BT/Co, (f) BT/Tb.



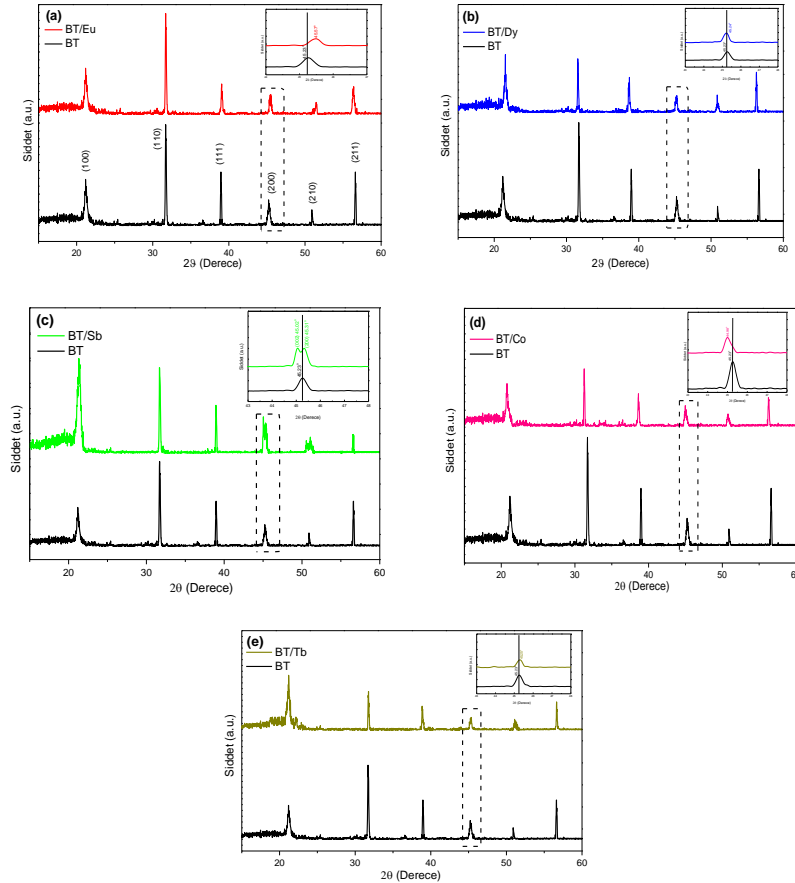
1200°C'de sinterleme işlemi görmüş katkısız BT, BT/Eu, BT/Dy, BT/Sb, BT/Co, BT/Tb numunelerine ait XRD kırınım desenleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'de gösterilen siyah grafikte, BT perovskit kübik yapısına karşılık gelen 22.15°, 31.49°, 38.79°, 45.23°, 50.79°, 56.09° 2θ açı değerleri (1 0 0), (1 1 0), (1 1 1), (2 0 0), (2 1 0), (2 1 1) düzlemlerindeki pikler ile karakterize edilmiştir (JCPDS No. 31-0174). Ek olarak tüm XRD desenlerinde (Şekil 3) herhangi bir ikincil faz bulunamamıştır. Ayrıca Çizelge 4'de, Maud 2.79 V yazılımı yardımıyla ve Rietveld arıtımı ile araştırılan, katkısız ve katkılı BT örneklerinin kristal kafes parametresi ve özellikleri gösterilmiştir. Kristalit boyutları, Debye-Scherrer formülü ( $D\beta\cos\theta = k\lambda Cu$ ) kullanılarak (200) düzleminde hesaplanmıştır. Formülde,  $\theta$  pik açısı,  $k = 0.94$ ,  $\lambda Cu = 0.15406$  nm,  $D$  kristalit boyutu (nm),  $\beta$  ise pikin maksimum yarı noktasındaki tam genişliktir [31].

Şekil 3a'da BT/Eu(kırmızı) ve katkısız BT(siyah) XRD kırınım desenleri gösterilmiştir. Siyah grafikte belirtilen  $2\theta=45.23^\circ$  tepe noktası (2 0 0), Eu doplaması ile  $2\theta=45.57^\circ$ 'ye doğru belirgin bir açı kaymasına sahiptir (Çizelge 4). Sözü edilen açı kayması Eu iyonunun eklenmesiyle perovskit BT kafesin daralması olarak anlaşılabilir (Şekil 3a, içerdeki şekil). Ayrıca, havada sinterleme işlemi gördüğü takdirde, BT perovskit kristal kafeste 0.112 nm iyonik yarıçapa sahip  $Eu^{+3}$ 'ün 0.135 nm iyonik yarıçaplı  $Ba^{+2}$  alanlarında ikame edildiği bilinmektedir (Çizelge 3) [11,28]. Böylece Eu ikamesi, katkısız BT'nin birim hücre hacminin 64.93 Å<sup>3</sup>'ten 63.26 Å<sup>3</sup>'e düşmesine yol açmıştır (Çizelge 4). Öte yandan Dy (Şekil 3b) ve Tb (Şekil 3e) doplamaları ile elde edilen örneklerin XRD desenlerinde,  $2\theta=45.23^\circ$  tepe noktası BT/Eu numunesine benzer netlikte açılara sahip değildir. Ek olarak diğer katkılılandırılmış örnekler ile kıyaslandığında en yüksek kristalit boyutları sırasıyla BT/Dy ve BT/Tb örneklerinde elde edilmiştir (Çizelge 4). Bunun nedeni Dy ve Tb'nin perovskit kristal kafesin hem A hem B bölgelerinde ikame edilmesi olarak açıklanabilir (Çizelge 3)[32,33]. Örneğin,  $Dy^{+3}$  (0.117 nm), A bölgesi (0.134 nm) için daha küçük bir iyonik yarıçapa sahiptir ve kafes daralmasına yol açabilir.  $Dy^{+3}$  iyonlarının B bölgede (0.068 nm) ikame edilmesi durumunda ise kristal kafesin genişlemesi söz konusu olabilmektedir [34]. Bu çalışmada muhtemelen Dy'nin kristal kafes içerisinde A ve B bölgelerine random yerleşmesi ile ilişkili olarak Dy ilavesinin BT kristal kafeste belirgin olmayan bir değişikliğe yol açtığı söylenebilir (Çizelge 4). BT/Tb (Şekil 3e) örneğinde ise durum biraz daha karmaşıktır. Bileşiklerde Tb,  $Tb^{+3}$  veya yarı dolu bir 4f kabuğu ile metastabil  $Tb^{+4}$  olarak mevcut olabilir.  $Tb^{+3}$  (0.0923 nm) 'e göre daha küçük iyonik boyuttaki  $Tb^{+4}$  (0.076 nm) 'ün B bölgede ikame edildiği düşünülmüş olsa da, çoğu araştırmacı perovskit kristal yapının hem A hem B bölgesine Tb'nin üç değerlik alarak dahil edildiği konusunda hemfikirlerdir [33]. Bu nedenle bu çalışmada da  $Tb^{+3}$  (0.0923 nm) 'ün hem  $Ti^{+4}$  hem  $Ba^{+2}$  bölgelerinde kısmi olarak ikame edildiği öne sürülebilir (Çizelge 3). Böylece, BT/Tb örneğinde BT numunesine kıyasla kristalit boyutunda çok az bir değişiklik gözlenmiş, katkılılandırılan diğer numunelere kıyasla en yüksek kristalit boyutu ve kafes hacmi değerlerinden biri BT/Tb örneğinde elde edilmiştir (Çizelge 4).

**Çizelge 4.** Numuneler kristal kafes parametreleri ve özellikleri.

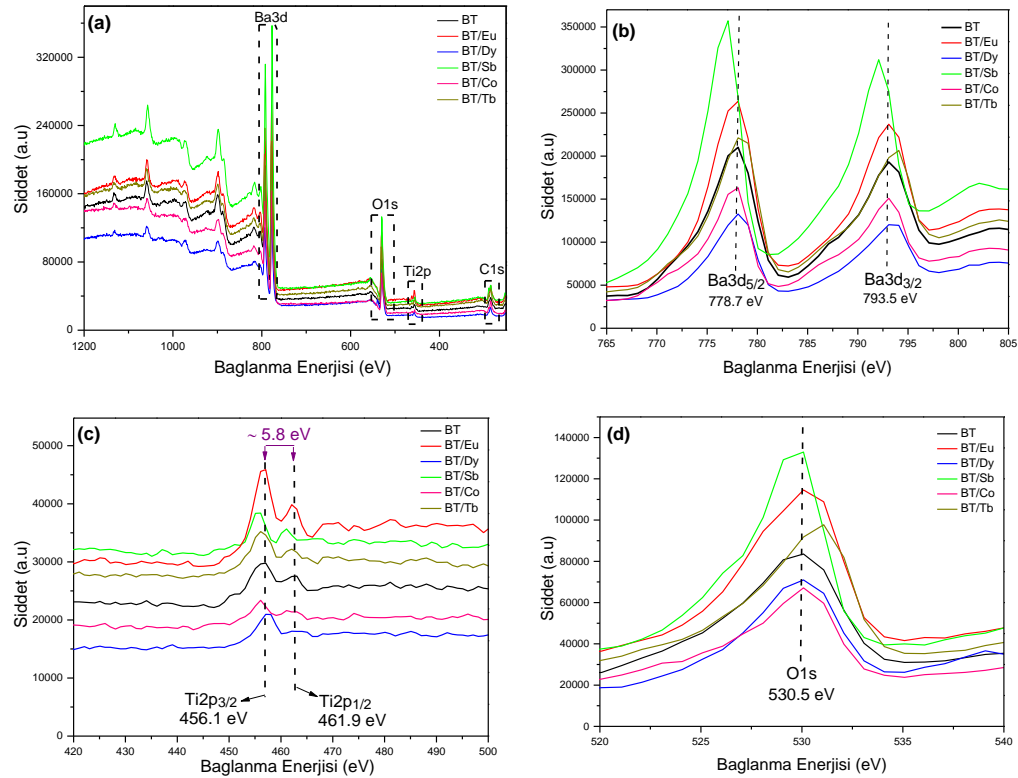
| Malzeme | a (Å) | Kristalit boyutu (Å) | (200) düzleminde 2θ açısı | Birim hücrenin hacmi (Å <sup>3</sup> ) |
|---------|-------|----------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| BT      | 4.02  | 378                  | 45.23                     | 64.96                                  |
| BT/Eu   | 3.98  | 223                  | 45.57                     | 63.26                                  |
| BT/Dy   | 4.00  | 281                  | 45.24                     | 64                                     |
| BT/Sb   | 3.97  | 185                  | 45.31                     | 62.79                                  |
| BT/Co   | 3.99  | 256                  | 44.98                     | 63.99                                  |
| BT/Tb   | 4.01  | 278                  | 45.25                     | 64.61                                  |

Şekil 3e'deki fosforlu yeşil ile gösterilen kırınım deseninde  $2\theta=45.23^\circ$  bulunan tepe noktasının Sb katkısı ile bölündüğü gözlenmiştir. Yeni yansımalar veya kırınım deseninde meydana gelen bölünmeler BT perovskit yapısındaki simetri değişimini göstermektedir [3]. Yapıya Sb'nin eklenmesi BT kafesindeki iyon paketlenmesinde düzensizliklerin görülmesine ve böylece BT kristal kafeste simetri değişikliğe neden olmuştur. Ayrıca, en küçük kristalit boyutu,  $Sb^{+3}$  ile katkılandırılmış BT/SB numunesinde elde edilmiştir. İyonik yarıçapı 0.076 nm olan üç değerlikli Sb iyonları (Çizelge 3), 0.065 nm iyonik yarıçapa sahip  $Ti^{+4}$  iyonları yerine 0.135 nm iyonik yarıçaplı  $Ba^{+2}$ 'nin alanlarında ikame etme eğilimindedir [28]. Ba ve Sb arasındaki önemli iyonik yarıçap farkı, kristalit boyutu ve birim hücre hacmindeki azalmayı açıklamaktadır (Çizelge 4). Öte yandan havada sinterleme işlemi neticesinde 0.063 nm iyonik yarıçapa sahip  $Co^{+3}$ 'ün Ti bölgelerindeki ikamesi [35], BT numunesinin birim hücre hacmini  $63.99 \text{ \AA}^3$ 'e düşürmüştür (Çizelge 4). Ek olarak Co ikamesinin BT yapısı üzerindeki etkisi, kübik kafesinin karakteristiği olan (2 0 0) düzlemindeki yansımayı  $2\theta = 44.98^\circ$ 'e kaydırması olarak gözlenmiştir (Şekil 3d, küçük şekil).



Şekil 3. Katkısız ve katkılı BT seramik tozlarına ait XRD kırınım desenleri; (a)BT(siyah) ve BT/Eu(kırmızı), (b) BT ve BT/Dy (mavi), (c) BT ve BT/Sb(fosforlu yeşil), (d) BT ve BT/Co (pembe), (e) BT ve BT/Tb(koyu sarı).

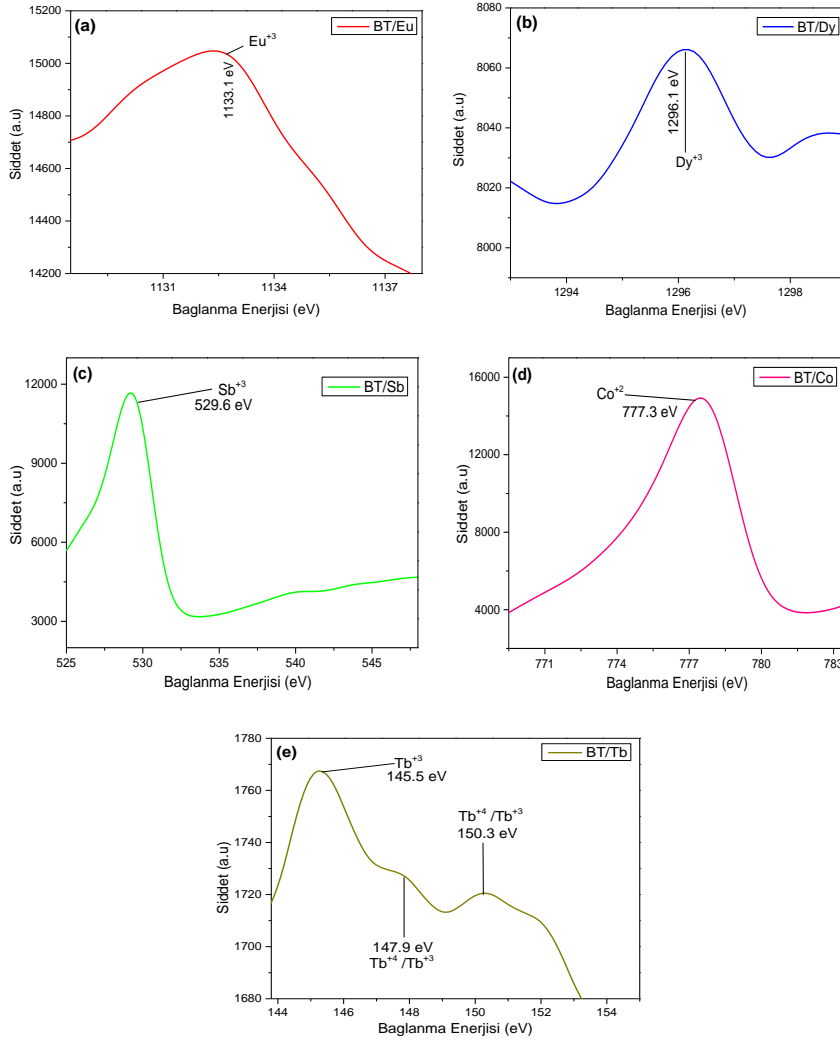
Şekil 4’de katkılı ve katkısız BT numunelerinin XPS genel ve elemental spektrumları gösterilmiştir. Genel spektrumda (Şekil 4a), Ba, Ti ve O elementlerinin yanı sıra safsızlık olarak bulunan karbon açıkça görülmektedir. Kontaminasyondan kaynaklanan karbonun, C1s, bağlanma enerjisi 283.7 eV’de tespit edilmiştir. Ek olarak Ba3d<sub>5/2</sub> ve Ba3d<sub>3/2</sub> ‘nin bağ enerjileri sırasıyla 778.7 eV ve 793.5 eV olarak ölçülmüştür ve bu değerler Ba’nın standart değerleri ile uyumludur [36]. Öte yandan, O1s pik değeri önceki çalışmalar [37,38] ile tutarlı olarak 530.5 eV’de gözlenmiştir ve stokiometrik olmayan oksitlerde kimyasal olarak emilen oksijen nedeniyle oksijen boşluklarında adsorbe edilen O<sub>2</sub> durumuna atfedilebilir. Ayrıca, genellikle perovskitler ve TiO<sub>2</sub> için bildirilen bağlanma enerjileri [37–39] ile tutarlı olarak, Ti2p<sub>3/2</sub> ve Ti2p<sub>1/2</sub> için bağ enerjileri sırasıyla 456.1 eV ve 461.9 eV’de ölçülmüştür. Ti2p pikleri arasındaki fark yaklaşık 5.8 eV’dir ve standart değerlerle yüksek bir tutarlılık içerisinde [40].



**Şekil 4.** Katkılı ve katkısız BT örneklerinin XPS spektrumları; (a) Genel Xps spektrumu, (b) Ba3d elemental spektrum, (c) Ti2p elemental spektrum, (d) O1s elemental spektrum.

Katkısız BT ile kıyaslandığında BT/Eu örneğine ait Ba3d (Şekil 4b), Ti2p (Şekil 4c) ve O1s (Şekil 4d) elemental spektrumların tepe şiddet değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Eu ikamesinin, Ba3d ve Ti2p pik zirvelerinde küçük kaymalara neden olduğu düşünülebilir. Buna ek olarak Ti2p<sub>3/2</sub> (456.1 eV) ve Ti2p<sub>1/2</sub> (462 eV) orbital-spin bağlanma enerjileri arasındaki fark yaklaşık 5.8 eV olarak korunmuştur. Ayrıca Şekil5a’da BT/Eu örneğine ait Eu3d XPS elemental spektrumu gösterilmiştir. 1133.1 eV bağlanma enerjisinde gözlemlenen Eu<sup>+3</sup> tespit edilmiştir. Bağlanma enerjisindeki pikin Eu<sup>+3</sup> oksidasyon durumu ile ilişkili olduğu diğer yazarlar tarafından önceki çalışmalarda bildirilmiştir [41–

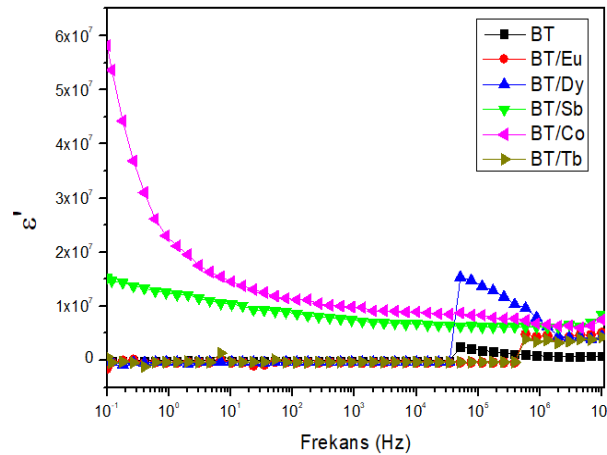
43]. BT/Eu örneğinin XPS spektrumundan elde edilen sonuçlar Ba, Ti, Eu ve O değerliklerinin sırasıyla +2, +4, +3 ve -2 olduğunu doğrulamıştır. BT/Dy örneğinde ise katkısız BT<sup>3</sup>'ye ait Ba3d<sub>5/2</sub> (778.7 eV) ve Ba3d<sub>3/2</sub> (793.5 eV) zirvelerinin şiddet değerleri nispeten azalmış ve zirvelerde kaymalar gözlenmiştir (Şekil 4b). BT/Dy numunesi Ba3d (777.8 eV, 794.1 eV) ve Ti2p (457.1 eV, 462.1 eV) grafiklerinde diğer numunelere nazaran en düşük zirve yoğunlukları sergilemiştir. +2 /+3 ve +3/+4 valans yüklerinin sırasıyla Ba3d ve Ti2p'de hibritlendiği iyi bilinmektedir. Eklenen Dy iyonları nedeniyle zirveler değişmiş ve farklı valans yüküne sahip olan iç tepe noktalarının ayrılmasına neden olmuştur. Böylece tüm piklerin yoğunluğu azalmış ve Ba3d ve Ti2p'de pik kayması meydana gelmiştir[44]. Ek olarak Dy3d elemental XPS spektrumunda (Şekil 5b) gösterilen Dy<sup>+3</sup> elektronik durumu, 1296.1 eV bağlanma enerjisinde tespit edilmiş olup Dy<sup>+3</sup>'nin oksidasyonu ile ilişkisi araştırmalar neticesinde doğrulanmıştır [45,46].



**Şekil 5.** Katkılı numunelerin elemental XPS spektrumları; (a)Eu3d, (b)Dy3d, (c) Sb3d, (d) Co2p, (e) Tb4d.

Şekil 5c’de, BT/Sb örneklerine ait Sb3d elemental spektrumu gösterilmiştir. Önceki çalışmalarda  $Sb^{+3}$ ’ün baskın olduğu  $Sb^{+3}$  ve  $Sb^{+5}$  olmak üzere iki farklı oksidasyon durumunun varlık gösterdiği ileri sürülmüştür. Her iki bileşen arasındaki bağlanma enerjisi farkı  $0,6 \pm 0,7$  eV olarak bildirilmiştir [47]. Düşük doplama miktarları için +5 değerlikli Sb ön plana çıkarken, Sb içeriğinin artışı ile birlikte  $Sb_2O_3$  ve  $Sb_2O_5$  fazlarında yüksek konsantrasyonlarda görülen  $Sb^{+3}$  bileşeni daha önemli hale gelmektedir. Burada 529.6 eV bağlanma enerjisinde  $Sb^{+3}$  iyonları görülmekle birlikte, 529.32 eV’de tespit edilen O1s zirveleri ile çakışma söz konusudur. Bu durum, Şekil 4d’de gösterilen O1s elemental spektrumunda,  $Sb^{+3}$  iyonlarının katkısız BT örneklerine nazaran sahip olduğu yüksek yoğunluğu açıklamaktadır.

BT/Co numunesine ait Co2p elemental XPS spektrumu Şekil 5d’de gösterilmiştir.  $Co^{+2}$  iyonunun bağlanma enerjisi 777.3 eV’de tespit edilmiştir. Öte yandan Şekil 4b’de BT/Co numunesinin  $Ba3d_{5/2}$  zirvesinde gözlenen iki tepe noktası  $Co2p_3$  ve  $Ba3d_3$ ’e ait olarak bulunmuştur. Sırasıyla 777.3 eV ve 777.4 eV bağlanma enerjilerine sahip  $Co^{+2}$  iyonu ile  $Ba^{+2}$  iyonu spektrumda birbiri ile iç içe geçmiş şekildedir. Bu zirveleri birbirinden ayırmak mümkün olmadığı için  $Co^{+2}$  ve  $Ba^{+2}$  bağlanma enerjisi bölgesindeki XPS spektrumlarında bulunan elektronik durumlar, ‘‘X-ışını Fotoelektron Spektroskopisinin El Kitabı’’ [40] ile kontrol edilmiş ve doğruluğu teyit edilmiştir. Ayrıca BT/Tb örneğininin Tb4d elemental XPS spektrumu Şekil5e’de gösterilmiştir. Tb4d elektronik düzeyi genellikle çoklu yapıda +3/+4 şekilde görülmektedir. Tb4s’in bir göstergesi olarak 155 eV bağlanma enerjisi beklenmekte iken,  $Tb^{+3}$  için yaklaşık 153, 150 ve 147 eV bağlanma enerjileri gözlenmektedir [48]. Bu bilgilere dayanarak Tb’nin üç değerlikli olup olmadığı kolaylıkla anlaşılabilir. Şekil 5e’de BT/Tb örneğininin Tb4d spektrumunda 145.5 eV’de bulunan zirvenin  $Tb^{+3}$  yapısı ile ilişkili olduğu açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, 147.9 ve 150.3 eV’deki iki ara tepe noktası kesin olarak ayırt edilememektedir, çünkü her bir tepe noktası  $Tb^{+4}$  ve  $Tb^{+3}$  çizgilerinin üst üste binmesiyle oluşmaktadır. Ancak metastabil ve kararlı oksidasyon durumu olan  $Tb^{+4}$ ’ün yerine Tb’nin üç değerlik olarak yapıdaki ikamesi, Şekil 4c’deki Ti2p spektrumundaki değişiklik ile teyit edilmiştir. Katkısız BT için  $Ti2p_{3/2}$  ve  $Ti2p_{1/2}$  orbital-spin bağlanma enerjileri 456.1 eV ve 461.9 eV olup, BT/Tb numunesinde bu değerler sırasıyla 455.4 eV ve 460.8 eV’ye düşmüştür.



Şekil 6. Katkılı ve katkısız BT seramik tozlarının dielektrik sabiti-frekans grafiği; katkısız BT (siyah); BT/Eu (kırmızı); BT/Dy (mavi); BT/Sb (fosforlu yeşil); BT/Co (pembe); BT/Tb (koyu sarı).

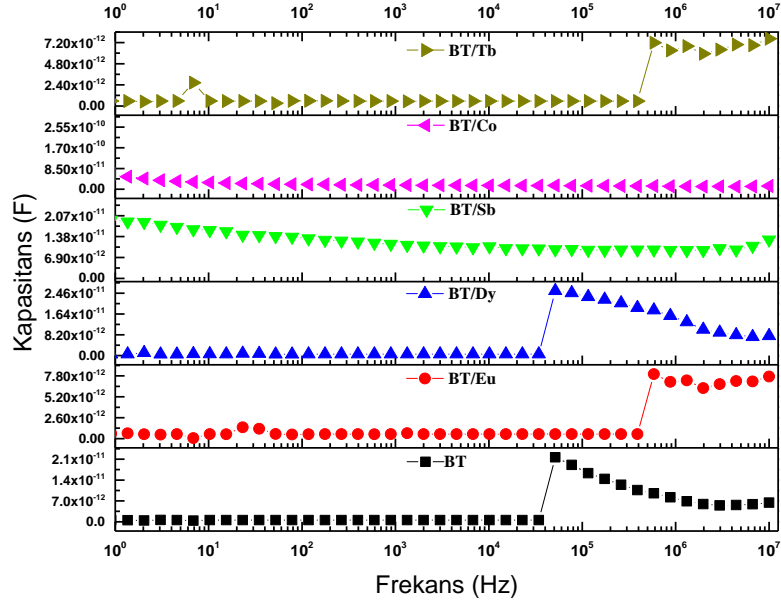
Daha önceki çalışmalarda, BT seramik tozlarında tane büyüklüğünün mikro ölçeğe indirgenmesiyle, ferroelektrik fazın dielektrik sabitinin ilk önce arttığı ve sonra azaldığı bildirilmiştir [49–51]. Ayrıca 0.8-1 µm tane büyüklüğü civarında maksimum dielektrik sabiti elde edilmektedir [50]. Bu çalışma kapsamında elde edilen katkısız BT tozlarının ortalama tane boyutunun 3.83 µm olarak ölçüldüğü Çizelge 2’de belirtilmiştir. Ek olarak Katkısız BT tozlarının 10<sup>7</sup> Hz değerine karşılık gelen dielektrik sabiti 834,830 olarak tespit edilmiştir (Çizelge 5). Katkı ilavesi ile tane boyutunun azalması (Çizelge 2), buna bağlı olarak dielektrik sabitindeki artış (Çizelge 5) dielektrik sabiti-frekans grafiğinde (Şekil 6) açıkça görülmektedir. Farklı nadir toprak elementleri (Eu, Dy, Tb), ve diğer elementler (Co ve Sb) ile katkılandırma BT’nin dielektrik özellikleri üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Eu katkılı BT (kırmızı) ve Tb katkılı BT (koyu sarı) grafiklerinde 10<sup>6</sup> Hz ve 10<sup>7</sup> Hz arasında katkısız BT grafiği (siyah) ile karşılaştırıldığında dielektrik sabitinin belirgin şekilde artış gösterdiği ve 10<sup>7</sup> Hz frekansına karşılık gelen dielektrik sabitlerinin sırasıyla 5,089,900 ile 4,307,600 değerlerine ulaştığı (Çizelge 5) tespit edilmiştir. BT/Dy grafiğine (mavi) bakıldığı zaman ise katkısız BT (siyah) grafiğinden çok daha büyük dielektrik sabitine (4,436,500) sahip olduğu 10<sup>7</sup> Hz frekans değerinde belirgin şekilde görülmektedir. Nadir toprak elementleri katkısı ile dielektrik sabitindeki artış, katkı malzemelerinin BT perovskit kafesi içinde ikame edilmesi sonucu ile uyumludur. Dielektrik sabitlerindeki en yüksek artış ise Sb ve Co katkılı BT seramik tozlarının grafiklerinde görülmektedir. Şekil 6’da BT/Sb (fosforlu yeşil) grafiği ile BT/Co grafiği (pembe), Sb ve Co’nun saf BT’nin (siyah) elektriksel özellikleri üzerindeki modifikasyonunu açıkça ortaya koymaktadır. Çizelge 5’de gösterilen 10<sup>7</sup> Hz değerine karşılık gelen dielektrik sabitleri Co ve Sb katkı malzemeleri için sırasıyla 7,518,200 ile 8,387,100 değerleridir. Belirgin şekilde görülen dielektrik sabitlerindeki artış, Sb’nin ve Co’nun BT kristal yapısında neden olduğu değişim ile açıklanabilir.

**Çizelge 5.** Katkılı ve katkısız BT örneklerinin 10<sup>7</sup> Hz değerine karşılık gelen dielektrik sabitleri.

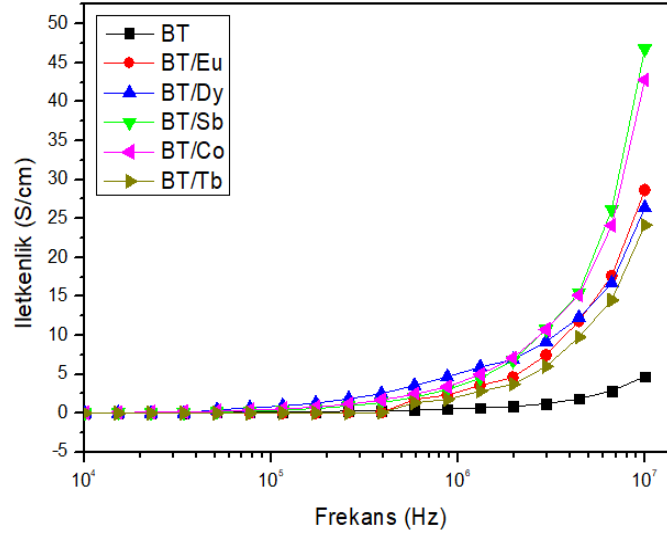
| Malzeme | Dielektrik sabiti |
|---------|-------------------|
| BT      | 834,830           |
| BT/Eu   | 5,089,900         |
| BT/Dy   | 4,436,500         |
| BT/Sb   | 8,387,100         |
| BT/Co   | 7,518,200         |
| BT/Tb   | 4,307,600         |

Ayrıca katkılı ve katkısız BT seramik tozların frekansa bağlı kapasitans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 7’de özellikle yüksek frekans aralığında kapasitans değişiminin az olması bir başka deyişle lineer grafiklerin elde edilmesi iyi kapasitif özelliklere sahip katkılı ve katkısız BT’lerin elde edildiğini göstermektedir. Öte yandan tüm numunelerin oda sıcaklığında yapılan ölçümlerinde, Şekil 8’de görüleceği üzere, katkısız BT’nin (siyah), katkı malzemesine bağlı olarak iletkenliğinde artış görülmüştür. En yüksek iletkenlik artışı 46.817 S/cm değerine ulaşan BT/Sb örneğinde (fosforlu yeşil) gözlenirken, en düşük artış 24.123 S/cm değeri ile BT/Tb (koyu sarı) numunesine ait grafikte gözlenmiştir.





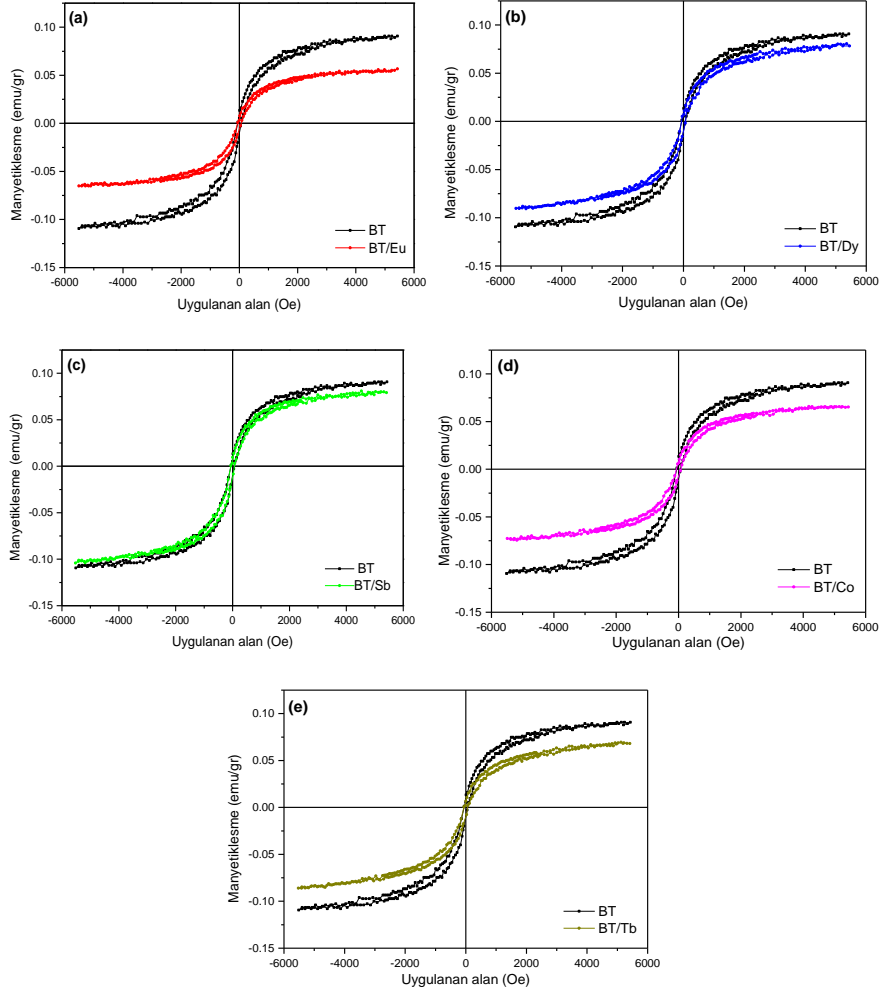
**Şekil 7.** Katkılı ve katkısız BT seramik tozlarının kapasitans-frekans grafiği; katkısız BT (siyah); BT/Eu (kırmızı); BT/Dy (mavi); BT/Sb (fosforlu yeşil); BT/Co (pembe); BT/Tb (koyu sarı).



**Şekil 8.** Katkılı ve katkısız BT seramik tozlarının iletkenlik-frekans grafiği; katkısız BT (siyah); BT/Eu (kırmızı); BT/Dy (mavi); BT/Sb (fosforlu yeşil); BT/Co (pembe); BT/Tb (koyu sarı).

Farklı doplama malzemelerinin her biri için oda sıcaklığında uygulanan alana bağlı manyetikleşme (mıknatıslanma) ölçümleri Şekil 9’da gösterilmiştir. Her bir grafikte katkısız BT tozlarının (siyah) histerezis döngüsü belirtilmiştir. Düşük bir zorlayıcı alan etkisiyle katkısız BT tozlarına ait

domainlerin kolaylıkla yönlendirilerek polarizasyon oluşturabileceği anlaşılmaktadır. Ek olarak farklı katkı malzemeleri ile S şeklinde histeresis çevrimlerinin gözlenmesi katkılanmış BT seramik tozlarında ferromanyetik davranışların tezahürüdür.



**Şekil 9.** Katkılı ve katkısız BT numunelerinin histeresis çevrimleri; (a) BT (siyah) ile BT/Eu (kırmızı), (b) BT (siyah) ile BT/Dy (mavi), (c) BT (siyah) ile BT/Sb (fosforlu yeşil), (d) BT (siyah) ile BT/Co (pembe), (e) BT (siyah) ile BT/Tb (koyu sarı).

Bu çalışmada tüm katkılandırma işlemleri için kullanılan katkı malzemelerinin oranı ve üretim yöntemi aynı olduğundan, manyetik özelliklerde meydana gelen değişiklikler kullanılan katkı malzemelerinin özellikleri düşünülerek değerlendirilmelidir. Katkısız ve katkılı tüm numuneler için dikkate değer bir ferromanyetik davranış görülse de (Şekil 9),  $M_s$  değerleri önemli ölçüde değişiklik göstermiştir. Örneğin, katkısız BT'nin  $M_s$  değeri 0.09067 emu/gr'den, Eu katkısından sonra 0.05659 emu/gr değerine düşmüştür. Eu iyonlarının BT perovskit kafesin A bölgelerindeki ikamesi ile  $M_s$ 'de net bir azalmaya yol açan spin düzenlemesinin değişmiş olduğu düşünülebilir. BT/Eu numunesine

benzer şekilde BT/Dy ve BT/Tb numunelerinde, nadir toprak iyonlarının manyetik momentlerinin lokalize olmuş 4f elektronlarına bağlı olması [33], katkısız BT'ye kıyasla daha düşük Ms değerlerine neden olmuştur. A ve B bölgelerde ikame edilen Dy (Şekil 9b) ve Tb (Şekil 9e) katkılı BT numunelerinde, 0.07831 emu/gr ve 0.06810 emu/gr Ms değerleri elde edilmiştir. Şekil 9d'de ise Co katkısının önceki çalışmalara benzer şekilde BT'nin (siyah grafik) manyetik momentini düşürdüğü açıkça görülmektedir. Ms değeri BT/Co numunesi için 0.06523 emu/gr olarak kaydedilmiştir. Co atomunun BT yapısında B bölgesinde ikame edilmesi ile (Çizelge 3), komşu Ti ve Co atomları oksijen boşluklarından uzaklaşmakta, tüm mesafeler katkısız BT kristalindeki bağ uzunluklarından daha fazla değerlere ulaşmaktadır. Oksijen boşluğunun meydana gelmesi nedeniyle Co katkılı BT(pembe) katkısız BT'ye (siyah) kıyasla daha düşük manyetik momente sahiptir [52]. En az net mıknatıslık değişiminin elde edildiği BT/Sb örneğinde ise Ms değeri 0.07922 emu/gr olarak elde edilmiştir. Burada, en iyi ferromanyetik davranış, en uygun Sb ikamesi nedeniyle spiral spin modülasyonunun ikame kaynaklı baskılanmasına atfedilebilir.

#### 4. SONUÇ

Sahip olduğu üstün ferromanyetik özellikler ve yüksek dielektrik katsayısı nedeniyle son yıllarda son derece dikkat çekici bir malzeme olan BT'nin nanometrik ve mikron ölçekte üretimi, elektronik aygıtların tasarımında ve minyatürizasyonunda kritik bir rol oynamaktadır. BT'nin manyetik ve elektriksel özelliklerinin modifikasyonunda nadir toprak elementleri ile doplama yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışma kapsamında Eu, Dy, Sb, Co ve Tb katkı malzemeleri kullanılarak oda sıcaklığında ferromanyetik özelliğinin korunarak elektriksel iletkenliğin geliştirildiği katkılı BT seramik tozlarının karıştırılmış oksit yöntemi ile elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda her bir katkı malzemesinin mol yüzdesi eşit tutularak, katkı malzemesinin BT yapısındaki elektriksel, morfolojik, manyetik etkisi araştırılmıştır. Elde edilen tozların SEM karakterizasyonlarında katkı malzemesinin genel olarak tane boyutunu küçülttüğü ortalama tane boyutu hesaplarından anlaşılmıştır. En yüksek tane boyutu değişimi Sb katkısı ile edilmiştir ve ortalama tane boyutu 3.83  $\mu\text{m}$ 'dan (katkısız BT),  $0.307 \pm 0.112 \mu\text{m}$ 'ye kadar düşmüştür. Öte yandan XRD karakterizasyonlarında  $22.15^\circ$ ,  $31.49^\circ$ ,  $38.79^\circ$ ,  $45.23^\circ$ ,  $50.79^\circ$ ,  $56.09^\circ$   $2\theta$  açısı değerleri (1 0 0), (1 1 0), (1 1 1), (2 0 0), (2 1 0), (2 1 1) düzlemlerindeki piklere karşılık gelmiş, yapılan araştırmalar sonucu katkılı ve katkısız her bir numune için BT perovskit kübik yapısı elde edildiği ortaya çıkmıştır. Ek olarak XRD deseninde herhangi bir ikincil faz tespit edilmemiştir. Elektriksel ölçümler sonucu yüksek frekans aralığında ( $10^6$  Hz ve  $10^7$  Hz), dielektrik sabiti her bir katkı malzemesi için katkısız BT'ye kıyasla artmış olup, en yüksek değer 8,387,100 ile BT/Sb örneklerinde görülmüştür. Frekansa bağlı kapasitans ölçümlerinde ise, yüksek frekanslarda stabil bir grafik elde edilmesi, saf BT'nin kapasitif özelliklerinin korunduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca frekansa bağlı iletkenlik özelliği incelenmiş, tüm katkı malzemelerinin oda sıcaklığında yalıtkan davranış gösteren BT'nin iletkenlik özelliğini geliştirdiği gözlenmiştir. En yüksek iletkenlik değeri 46.817 S/cm ile BT/Sb numunesinden elde edilmiştir. Ek olarak oda sıcaklığında uygulanan alan- manyetikleşme ölçümleri gerçekleştirilmiş, her bir katkı ilavesi ile elde edilen histerezis çevrimleri S şeklinde gözlenmiştir. Katkılanmış BT seramik numunelerin ferromanyetik özelliğinin korunduğu bu şekilde ispat edilmiştir. Sonuç olarak beş farklı katkı malzemesi ile katkılanmış BT seramik numunelerde morfolojik, elektriksel ve manyetik performans açısından en etkin katkı malzemesi Sb olarak belirlenmiştir. İleriki çalışmalar, Sb katkısının BT içindeki mol yüzdesini arttırarak optimizasyonunu, Sb katkılı BT seramik numunelerin elektronik aygıtlara entegrasyonunu, kapasitör olarak kullanımının araştırılmasını kapsayabilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Dumlupınar Üniversitesi BAP ofisi (Proje No: 2017-62) tarafından finansal olarak desteklenmiştir. Yazarlar, katkılarından ötürü DPU-BAP 2017-62 nolu proje ekibine ve Musa AKMAN'a, bu araştırmanın gerçekleştirildiği Dokuz Eylül Üniversitesi, Elektronik Malzeme Üretim ve Uygulama Merkezi'ne (EMUM) ve sağladığı destek için EMUM çalışanları ile Çağlar ÖZER'e minnettardır.

## KAYNAKÇA

- [1] Jiang, B., Iocozzia, J., Zhao, L., Zhang, H., Harn, Y.-W., Chen, Y., Lin, Z., (2019), Barium titanate at the nanoscale: controlled synthesis and dielectric and ferroelectric properties, *Chemical Society Reviews*, 48 (4), 1194–1228.
- [2] Ashwini, L.S., Sridhar, R., Bellad, S.S., (2017), Dielectric and magnetoelectric properties of Li-Mg ferrite: Barium titanate composites, *Materials Chemistry and Physics*, 200, 136–145.
- [3] Petrović, M.M.V., Bobić, J.D., Banys, J., Stojanović, B.D., (2013), Electrical properties of antimony doped barium titanate ceramics, *Materials Research Bulletin*, 48 (10), 3766–3772.
- [4] Morrison, F.D., Sinclair, D.C., West, A.R., (2001), Characterization of lanthanum-doped barium titanate ceramics using impedance spectroscopy, *Journal of the American Ceramic Society*, 84 (3), 531–538.
- [5] Lu, D., Toda, M., and Sugano, M., (2006), High-permittivity double rare-earth-doped barium titanate ceramics with diffuse phase transition, *Journal of the American Ceramic Society*, 89 (10), 3112–3123.
- [6] Rejab, N.A., Sreekantan, S., Razak, K.A., Ahmad, Z.A., (2011), Structural characteristics and dielectric properties of neodymium doped barium titanate, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 22 (2), 167–173.
- [7] Sun, Q., Gu, Q., Zhu, K., Jin, R., Liu, J., Wang, J., Qiu, J., (2017), Crystalline structure, defect chemistry and room temperature colossal permittivity of Nd-doped barium titanate, *Scientific Reports*, 7, 42274.
- [8] Petrović, M.M.V., Grigalaitis, R., Ilic, N., Bobić, J.D., Dzunuzovic, A., Banys, J., Stojanović, B.D., (2017), Interdependence between structure and electrical characteristics in Sm-doped barium titanate, *Journal of Alloys and Compounds*, 724, 959–968.
- [9] Ganguly, M., Rout, S.K., Woo, W.S., Ahn, C.W., Kim, I.W., (2013), Characterization of A-site deficient samarium doped barium titanate, *Physica B: Condensed Matter*, 411, 26–34.
- [10] Cai, W., Fu, C., Gao, J., Deng, X., Chen, G., Lin, Z., (2012), Effect of samarium on the microstructure, dielectric and ferroelectric properties of barium titanate ceramics, *Integrated Ferroelectrics*, 140 (1), 92–103.

- [11] Li, Y.-X., Yao, X., Wang, X.-S., Hao, Y.-B., (2012), Studies of dielectric properties of rare earth (Dy, Tb, Eu) doped barium titanate sintered in pure nitrogen, *Ceramics International*, 38, S29–S32.
- [12] Ben, L. and Sinclair, D.C., (2011), Anomalous Curie temperature behavior of A-site Gd-doped BaTiO<sub>3</sub> ceramics: The influence of strain, *Applied Physics Letters*, 98 (9), 92907.
- [13] Paunović, V. and Živković, L., (2010), Influence of Rare-Earth Additives (La, Sm and Dy) on the Microstructure and Dielectric Properties of Doped BaTiO<sub>3</sub> Ceramics, *Science of Sintering*, 42 (1), 69-79.
- [14] Paunovic, V., Mitic, V. V, Prijic, Z., Zivkovic, L., (2014), Microstructure and dielectric properties of Dy/Mn doped BaTiO<sub>3</sub> ceramics, *Ceramics International*, 40 (3), 4277–4284.
- [15] Sun, Q., Gu, Q., Zhu, K., Wang, J., Qiu, J., (2016), Stabilized temperature-dependent dielectric properties of Dy-doped BaTiO<sub>3</sub> ceramics derived from sol-hydrothermally synthesized nanopowders, *Ceramics International*, 42 (2), 3170–3176.
- [16] Cernea, M., Galassi, C., Vasile, B.S., Ganea, P., Radu, R., Ghita, G., (2010), Electrical investigations of holmium-doped BaTiO<sub>3</sub> derived from sol-gel combustion, *Journal of Materials Research*, 25 (6), 1057–1063.
- [17] Mitic, V. V, Nikolic, Z.S., Pavlovic, V.B., Paunovic, V., Miljkovic, M., Jordovic, B., Zivkovic, L., (2010), Influence of rare-earth dopants on barium titanate ceramics microstructure and corresponding electrical properties, *Journal of the American Ceramic Society*, 93 (1), 132–137.
- [18] Jo, S.K., Park, J.S., Han, Y.H., (2010), Effects of multi-doping of rare-earth oxides on the microstructure and dielectric properties of BaTiO<sub>3</sub>, *Journal of Alloys and Compounds*, 501 (2), 259–264.
- [19] Hwang, J.H. & Han, Y.H., (2001), Dielectric properties of erbium doped barium titanate, *Japanese Journal of Applied Physics*, 40 (2R), 676.
- [20] Li, Y., Hao, Y., Wang, X., Yao, X., (2010), Studies of dielectric properties of rare earth (Y, Gd, Yb) doped barium titanate sintered in pure nitrogen, *Ferroelectrics*, 407 (1), 134–139.
- [21] Ismail, F.A., Osman, R.A.M., Idris, M.S., (2016), Review on dielectric properties of rare earth doped barium titanate, in M.F.B.M., Nazeri, L.B., Ying, and M.S.B., Idris (Eds.), *AIP Conference Proceedings*, 1756(1), 090005, AIP Publishing LLC.
- [22] Chen, Y.L., Yang, S.F., (2011), PTCR effect in donor doped barium titanate: review of compositions, microstructures, processing and properties, *Advances in Applied Ceramics*, 110 (5), 257–269.
- [23] Zakrzewska, K., (2001), Mixed oxides as gas sensors, *Thin Solid Films*, 391 (2), 229–238.
- [24] Cousin, P., Ross, R.A., (1990), Preparation of mixed oxides: a review, *Materials Science and Engineering: A*, 130 (1), 119–125.

- [25] Panigrahi, M., Shibata, E., Iizuka, A., Nakamura, T., (2013), Production of Fe–Ti alloy from mixed ilmenite and titanium dioxide by direct electrochemical reduction in molten calcium chloride, *Electrochimica Acta*, 93, 143–151.
- [26] Kantorová, M. Veselý, D., (2013), Mixed metal oxides with the structure of perovskite for anticorrosion organic coatings, *Physics Procedia*, 44, 213–223.
- [27] Ferrarelli, M.C., Tan, C.C., Sinclair, D.C., (2011), Ferroelectric, electrical, and structural properties of Dy and Sc co-doped BaTiO<sub>3</sub>, *Journal of Materials Chemistry*, 21 (17), 6292–6299.
- [28] Chiou, B.-S., Wang, I.-H., (1998), Effect of MgO addition on the electrical transport properties of highly Sb-doped BaTiO<sub>3</sub> ceramics, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 9 (2), 145–150.
- [29] Hreniak, D., Strek, W., Chmielowiec, J., Pasciak, G., Pazik, R., Gierlotka, S., Lojkowski, W., (2006), Preparation and conductivity measurement of Eu doped BaTiO<sub>3</sub> nanoceramic, *Journal of Alloys and Compounds*, 408, 637–640.
- [30] Lu, D.-Y., Cui, S.-Z., Liu, Q.-L., Sun, X.-Y., (2016), Dielectric properties and defect chemistry of barium titanate ceramics co-doped R and Dy ions (R= Eu, Gd, Tb), *Ceramics International*, 42 (13), 14364–14373.
- [31] Yildirim, S., Akalin, S.A., Oguzlar, S., Ongun, M.Z., Ozer, C., Erol, M., (2019), Comparison of structural and optical properties of CeO<sub>2</sub> and CeO<sub>2</sub>: Eu<sup>3+</sup> nanoparticles synthesized via sol–gel and flame spray pyrolysis methods, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30 (14), 13749–13756.
- [32] Park, K.-J., Kim, C.-H., Yoon, Y.-J., Song, S.-M., Kim, Y.-T., Hur, K.-H., (2009), Doping behaviors of dysprosium, yttrium and holmium in BaTiO<sub>3</sub> ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 29 (9), 1735–1741.
- [33] Lu, D.-Y., (2015), Self-adjustable site occupations between Ba-site Tb<sup>3+</sup> and Ti-site Tb<sup>4+</sup> ions in terbium-doped barium titanate ceramics, *Solid State Ionics*, 276, 98–106.
- [34] Lee, W.-H., Groen, W.A., Schreinemacher, H., Hennings, D., (2000), Dysprosium doped dielectric materials for sintering in reducing atmospheres, *Journal of Electroceramics*, 5 (1), 31–36.
- [35] Buscaglia, M.T., Buscaglia, V., Viviani, M., Nanni, P., Hanuskova, M., (2000), Influence of foreign ions on the crystal structure of BaTiO<sub>3</sub>, *Journal of the European Ceramic Society*, 20 (12), 1997–2007.
- [36] Gao, D., Xiao, D., Bi, J., Yu, P., Yu, G., Zhang, W., Zhu, J., (2003), Hydrothermal syntheses of barium strontium titanate thin films, *Materials Transactions*, 44 (7), 1320–1323.
- [37] Chornik, B., Fuenzalida, V.A., Grahmann, C.R., Labbé, R., (1997), Water adsorption properties of amorphous BaTiO<sub>3</sub> thin films, *Vacuum*, 48 (2), 161–164.

- [38] Mukhopadhyay, S.M., Chen, T.C.S., (1995), Surface chemical states of barium titanate: Influence of sample processing, *Journal of Materials Research*, 10 (6), 1502–1507.
- [39] Demri, B., Hage-Ali, M., Moritz, M., Kahn, J.L., Muster, D., (1997), X-ray photoemission study of the calcium/titanium dioxide interface, *Applied Surface Science*, 108 (2), 245–249.
- [40] Moulder, J.F., Stickle, W.F., Sobol, P.E., Bomben, K.D., (1992), Handbook of x-ray photoelectron spectroscopy, In J. Chastain (Ed.), Perkin-Elmer Corporation, Physical Electronics Division, Eden Prairie Minn, 55344, 82.
- [41] Padalia, B.D., Prabhawalkar, V., Prabhawalkar, P.D., Sampathkumaran, E. V, Gupta, L.C., Vijayaraghavan, R., (1981), ESCA studies of some mixed-valence rare-earth intermetallics, *Bulletin of Materials Science*, 3 (2), 163–167.
- [42] Cabello, G., Lillo, L., Caro, C., Buono-Core, G.E., Chornik, B., Soto, M.A., (2008), Structure and optical characterization of photochemically prepared ZrO<sub>2</sub> thin films doped with erbium and europium, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354 (33), 3919–3928.
- [43] Qi, J., Matsumoto, T., Tanaka, M., Masumoto, Y., (2000), Europium silicate thin films on Si substrates fabricated by a radio frequency sputtering method, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 33 (16), 2074.
- [44] Kim, J., Kim, D., Kim, J., Kim, Y., Hui, K.N., Lee, H., (2011), Selective substitution and tetragonality by co-doping of dysprosium and thulium on dielectric properties of barium titanate ceramics, *Electronic Materials Letters*, 7 (2), 155–159.
- [45] Lo, F.-Y., Ting, Y.-C., Chou, K.-C., Hsieh, T.-C., Ye, C.-W., Hsu, Y.-Y., Chern, M.-Y., Liu, H.-L., (2015), Paramagnetic dysprosium-doped zinc oxide thin films grown by pulsed-laser deposition, *Journal of Applied Physics*, 117 (21), 213911.
- [46] Tshabalala, M.A., Dejene, F.B., Pitale, S.S., Swart, H.C., Ntwaeaborwa, O.M., (2014), Generation of white-light from Dy<sup>3+</sup> doped Sr<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> phosphor, *Physica B: Condensed Matter*, 439, 126–129.
- [47] Szczuko, D., Werner, J., Oswald, S., Behr, G., Wetzig, K., (2001), XPS investigations of surface segregation of doping elements in SnO<sub>2</sub>, *Applied Surface Science*, 179 (1–4), 301–306.
- [48] Lu, D.-Y., Peng, Y.-Y., Yu, X.-Y., Sun, X.-Y., (2016), Dielectric properties and defect chemistry of La and Tb co-doped BaTiO<sub>3</sub> ceramics, *Journal of Alloys and Compounds*, 681, 128–138.
- [49] Kinoshita, K., Yamaji, A., (1976), Grain-size effects on dielectric properties in barium titanate ceramics, *Journal of Applied Physics*, 47 (1), 371–373.
- [50] Gaytan, S.M., Cadena, M.A., Karim, H., Delfin, D., Lin, Y., Espalin, D., MacDonald, E., Wicker, R.B., (2015), Fabrication of barium titanate by binder jetting additive manufacturing technology, *Ceramics International*, 41 (5), 6610–6619.



*Gergeroğlu vd., Journal of Scientific Reports-B, Sayı 2, 9-28, Aralık 2020.*  
*Gergereođlu et all., Journal of Scientific Reports-B, Number 2, 9-28, December 2020.*

---

- [51] Ghayour, H., Abdellahi, M., (2016), A brief review of the effect of grain size variation on the electrical properties of BaTiO<sub>3</sub>-based ceramics, Powder Technology, 292, 84–93.
- [52] Cao, D., Liu, B., Yu, H., Hu, W., Cai, M., (2015), First-principles study of electronic and magnetic properties in Co doped BaTiO<sub>3</sub>, The European Physical Journal B., 88 (3), 75.



## AFYONKARAHİSAR İLİ DİNAR BÖLGESİ İÇİN RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİNDE YAPAY SİNİR AĞLARI MODELİNİN UYGULANMASI

Ali Hakan ÇOLAKER<sup>1</sup>, Serdar ÖZYÖN<sup>2</sup>, Ayhan GÜN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
[ali.colaker@ogr.dpu.edu.tr](mailto:ali.colaker@ogr.dpu.edu.tr), ORCID: 0000-0002-4809-6422

<sup>2</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
[serdar.ozyon@dpu.edu.tr](mailto:serdar.ozyon@dpu.edu.tr), ORCID: 0000-0002-4469-3908

<sup>3</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
[ayhan.gun@dpu.edu.tr](mailto:ayhan.gun@dpu.edu.tr), ORCID: 0000-0002-4223-2518

*Geliş Tarihi: 26.12.2019*

*Kabul Tarihi: 12.08.2020*

### ÖZ

Yapay sinir ağları (YSA), tahminleme alanında oldukça fazla kullanımı olan bir matematiksel modeldir. Bu çalışmada YSA'yı elektrik enerjisi üretimi alanında kullanarak, tahminleme işleminin daha bilimsel ve analitik olarak yapılması amaçlanmıştır. Araştırmada, rüzgâr sahasından temin edilen reel rüzgâr hızı değerleri kullanılan Matlab programı ve programın arayüzü olan nntool ile test edilmiş, tasarlanan ağ seçilen rüzgâr türbini hız-güç eğrileri kapsamında eğitilerek, hedeflenen değerlere çok fazla yakınsadığı saptanmıştır. YSA'nın rüzgârdan elektrik enerjisi üretiminin tahmini yanında, aynı zaman da rüzgâr hızlarını da rahatlıkla tahmin edebileceği anlaşılmıştır. Çalışmada oluşturulan yapay sinir ağı modellemesinin başarılı sonuçlar vermesi, rüzgâr enerjisine yatırım yapmak isteyen yatırımcılar ve proje ekipleri için bir yardımcı kaynak ve yol gösterici olması bakımından önemlidir. YSA ile yenilenebilir enerji kaynakları içinde benzer çalışmalar yapılabileceği düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** *Yapay Sinir Ağları, Rüzgâr Enerjisi, Rüzgâr Hızı, Enerji Üretimi, YSA Modellenmesi.*

### THE APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODEL IN ELECTRICITY GENERATION FROM WIND POWER FOR DİNAR REGION OF AFYONKARAHİSAR PROVINCE

#### ABSTRACT

Artificial Neural Network is a frequently used mathematical model in the field of estimation. In this study the aim is to do a more scientific and analytical estimation by using ANN in electrical power generation. In the study real wind speed values obtained from wind field have been tested with the used Matlab program and nntool which is the interface of the program. The designed network has been educated in the framework of the selected wind tribune speed-power curves and it has been determined that it converged too much to the targeted values. It has been understood that as well as the electrical power generation from wind with NNA, it will also be able to predict the wind speed

easily. The successful results of the Artificial Neural Network model formed in the study are important in that they are a helpful source and also guiding for the investors who want to invest in wind power and also for the project teams. It is thought that similar studies can also be done for renewable power sources with NNA.

**Keywords:** *Artificial Neural Network, Wind power, Wind speed, power generation, NNA Modelling.*

## 1. GİRİŞ

Ülkelerin gelişmişlik düzeylerini yükselten en önemli parametrelerden biri de enerjide dışa bağımlılığın azaltılabilmesidir. Bu sebeple enerji üretiminde farklı kaynakların kullanılması önem teşkil etmektedir. Enerjide arz güvenliğinin önemi kadar, bu arzı karşılamak için gereken kaynak çeşitliliği de önemli yer tutmaktadır. Ülkemizde enerji üretiminde, yerli kaynakların yanında, yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr, biokütle vb.) payları da giderek artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak rüzgâr enerjisi, geçmişten günümüze kadar pek çok farklı alanda kullanılmıştır. Günümüzde de elektrik enerji üretiminde temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak etkin kullanımı artarak devam etmektedir Türkiye’de rüzgâr üretiminde Marmara, Ege, Karadeniz ve İç Anadolu Bölgeleri ön plandadır. Bu bölgelerde rüzgâr hızları, enerji üretimi için daha uygun seviyelerdedir [1-3].

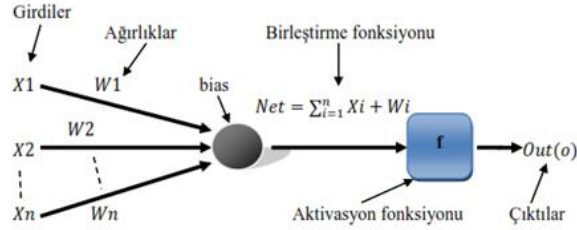
Bu çalışma için seçilen bölge Ege bölgesi, Afyonkarahisar ili Dinar ilçesi sınırlarında yer alan Burunkaya Köyü mevki’dir. Çalışmada lokasyon bilgisine göre elde edilen rüzgâr verileri ile YSA modeli oluşturularak MATLAB (2019b) sürümünde tahminleme yapılmıştır. Tahminleme çalışması için Siemens SWT2.3, Vestas V112, Nordex 100 firmalarına ait rüzgâr türbinleri ve bunlara ait üretim güçleri kullanılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve DEĞERLENDİRME

### 2.1. Yapay Sinir Ağları (YSA) Tanımı

İnsan beyni, insanların başarılı olduğu bilişsel, algısal ve kontrol görevlerinde, başarılı olabilecek büyük sinir ağlarının varlığının kanıtıdır. Beyin, algısal eylemleri (yüzlerin tanınması, konuşma vb.) ve kontrol faaliyetlerini (vücut hareketleri ve vücut fonksiyonları) yönetir. Beynin avantajı; hızlı olması, son derece paralel hesaplama yapabilmesi ve kesin olmayan bilgi işlem yeteneğinin etkin kullanımınıdır. Yapay sinir ağları (YSA), biyolojik sinir sistemlerinin matematiksel modellerinin geliştirilmesi olarak geliştirilmiştir. Sinir ağlarına ilk ilgilerin duyulması McCulloch ve Pitts (1943) tarafından basitleştirilmiş nöronların kullanılmasından sonra ortaya çıkmıştır [4].

Yapay sinir ağlarında temel mimari; giriş, gizli ve çıkış katmaları olarak üç tür nöron katmanından oluşur. İleri beslemeli ağlarda, sinyal akışı, kesinlikle ileri besleme yönünde, girdiden çıktı birimlerine doğrudur. Veri işleme de birden fazla birimin (katman) üzerine uzanabilir, ancak geri bildirim bağlantısı yoktur. Tekrarlayan ağlar geri bildirim bağlantıları içerir. İleri beslemeli ağların aksine, ağın dinamik özellikleri önemlidir. Bazı durumlarda, ünitelerin aktivasyon değerleri, ağın artık bu aktivasyonların değişmediği kararlı bir duruma geliştiği bir gevşeme işlemine tabi tutulur. Diğer uygulamalarda, çıkış nöronlarının aktivasyon değerlerinin değişmesi, dinamik davranış ağın çıktısını oluşturacak şekilde önemlidir [5].



**Şekil 1.** Basit bir yapay sinir hücresi (nöron) yapısı [4].

Rüzgâr santrali için üretim tahmininde kullanılacak veriler, MATLAB programı üzerinden ayarlanan ağırlıklar aracılığıyla model içerisinde yer alan nöronlara bağlanır ve fonksiyon içerisinde yer alan bu ağırlıkların sonucu olarak modele verilen rüzgâr verilerinin etkisini belirler.  $\Sigma$  sembolü ile ifade ettiğimiz toplam fonksiyonu, modelde elde edilen net girişi hesaplayarak bize çıkış verir. Hesaplanan bu sonuç, programa verilen rüzgâr hız değerlerinin yine programda her iterasyonda güncellenen ağırlıklar ile çarpılma işlemlerinin sonucudur. Yapay sinir ağlarında çeşitli aktivasyon fonksiyonları vardır. Logaritmik Sigmoid, Hiperbolik Tanjant bu aktivasyon fonksiyonlarından bazılarıdır. Seçilen aktivasyon fonksiyonu, modelin aldığı girişleri matematiksel modeline uygulayarak oluşan net çıkışı hesaplayarak çıkış verir. Yukarıda şekilde verilen  $b$  değeri bir sabittir, bias veya seçtiğimiz aktivasyon fonksiyonuna göre değeri değişen eşik olarak isimlendirilir [6].

$$\text{Çıkış, } Out(o) = f(W \cdot x + b) \quad (1)$$

Yukarıda verilen eşitlik nöron çıkışını hesaplar. Burada gösterilen  $W$  değeri ağırlıklar matrisi,  $X$  değerleri ise girişlerin matrisidir.  $N$  değeri modele sunulan giriş sayısı olarak alındığında;  $W_1, W_2, W_3, \dots, W_N$  sırasıyla Matlab programı içerisinde otomatik ayarlanan ağırlık değerleridir.  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$  değerleri 6 aylık rüzgâr hızı veri girişleri (m/s),  $b$  değeri ise yine program tarafından belirlenen bias değerleridir.

$$Net = \sum_{i=1}^n W_i X_i + b \quad \text{ve} \quad o = f(net) \quad (2)$$

$f$  aktivasyon fonksiyonu, yukarıdaki formülde belirtildiği gibi yazılabilir.

$$o = f(\sum_{i=1}^n W_i X_i + b) \quad (3)$$

Öğrenme olayı, yeni bir bilginin elde edilmesi ya da var olan bir bilginin artırılması yoluyla gerçekleşir. Farklı bir işlemi ya da aynı işlemleri daha efektif, hızlı ve etkili biçimde yapabilmek için sistemde uyarlanabilir değişiklikleri sağlamak makine öğrenimi adı altında belirtilir. Yapay sinir ağlarında öğrenme durumları denetimli, denimsiz ve destekleyici öğrenme olarak 3 farklı şekilde sınıflandırılırlar.

Denetimli öğrenme, daha önce doğru bir şekilde hazırlanmış ve atanmış verilerden veri örneğinin eğitilmesi prensibi üzerinedir. Bir yapay sinir ağının denetimli olması aynı anda hatanın geriye yayılma algoritması olarak isimlendirilmesine neden olur. Hata geri yayılma algoritması veri kaynağındaki giriş ve çıkış değerlerine göre eğitilir. Ağın hesapladığı çıkış ile gerçek çıkış arasındaki

hata oranını bulur ve bu orana göre nörondaki ağırlıkları günceller. Denetimli öğrenmede, yapay sinir ağları ile eğitilen veriler verimli sonuçlar vermektedir. YSA lineer ve non-linear problemlere, robotik, tahmin, sınıflandırma gibi alanlara çözümler bulur.

Ağırlıkları kendisi güncelleyen yapay sinir ağları, giriş için kullanılan verilerdeki gizli katmanları tanımlayabilmek için denetimsiz öğrenme şeklinde ifade edilen algoritmayı kullanır. Bu şekilde öğrenme durumunda, YSA çıkışında bir hata sinyali bulmayı aramaksızın veriyi eğitime, öğrenme ve organizasyonunu yapmayı hedefler [7].

## 2.2. Uygulama Aşaması

Bu çalışmada; yapay sinir ağlarını kullanarak rüzgâr hızı verisinden, rüzgâr türbinlerinin hızları ve güçleri ile elektrik üretimi tahminlenmiştir. Sinir ağı ile rüzgâr enerjisi üretim tahmini yapılırken Afyonkarahisar ili, Dinar ilçesi, Burunkaya Köyü mevkiine ait rüzgâr hızı verileri test için, 3 farklı rüzgâr türbinine ait hıza göre güç çıktıları ise giriş ve hedef değeri olarak kullanılmıştır. Araştırmada seçilen türbinlerin kule yüksekliği 85 m'tir. Modellemedeki rüzgâr hızı verileri Çizelge 1'de gösterilirken, türbinlerin 0-25 m/s arası rüzgâr hızı verisine göre ürettiği enerji miktarları Çizelge 2'de gösterilmiştir. Çizelge 2'de gösterilen 3 farklı rüzgâr türbini için güç-hız eğrilerinden çıkarılan enerji üretim miktarı gibi veriler türbin üretici firmalarının teknik kılavuzlarından elde edilmiştir [8-11].

**Çizelge 1.** Aylara göre ortalaması alınmış rüzgâr hızı verileri (m/s) (6 Aylık).

| Günler | Ocak  | Şubat | Mart  | Nisan | Mayıs | Haziran |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 1      | 10,91 | 8,82  | 5,79  | 5,26  | 8,97  | 4,01    |
| 2      | 8,44  | 4,21  | 4,66  | 6,04  | 8,73  | 7,26    |
| 3      | 13,63 | 5,75  | 5     | 4,71  | 4,59  | 4,79    |
| 4      | 10,58 | 8,34  | 3,95  | 3,03  | 5,91  | 5,78    |
| 5      | 8,35  | 12,76 | 4,66  | 5,11  | 8,47  | 5,25    |
| 6      | 7,65  | 13,94 | 6,13  | 11,77 | 9,18  | 4,21    |
| 7      | 4,69  | 4,08  | 6,12  | 6,32  | 10,34 | 5,92    |
| 8      | 10,31 | 2,78  | 2,99  | 8,70  | 5,66  | 7,51    |
| 9      | 7,14  | 4,98  | 4,24  | 10,49 | 3,69  | 7,46    |
| 10     | 15,39 | 3,56  | 6,45  | 9,72  | 6,57  | 5,28    |
| 11     | 14,19 | 6,69  | 8,3   | 9,37  | 3,97  | 5,02    |
| 12     | 8,01  | 10,18 | 12,98 | 4,91  | 3,92  | 4,74    |
| 13     | 3,91  | 8,67  | 10,04 | 7,82  | 3,55  | 8,00    |
| 14     | 9,31  | 11,24 | 5,23  | 4,53  | 5,50  | 9,30    |
| 15     | 14,48 | 10,63 | 7,19  | 4,22  | 5,65  | 5,49    |
| 16     | 13,54 | 9,98  | 7,77  | 4,45  | 3,88  | 3,69    |
| 17     | 5,73  | 5,79  | 7,51  | 7,07  | 8,62  | 4,10    |
| 18     | 3,56  | 5,65  | 3,88  | 8,11  | 5,03  | 3,21    |
| 19     | 4,41  | 2,84  | 3,03  | 7,90  | 4,55  | 3,75    |
| 20     | 6,22  | 3,26  | 3,86  | 9,47  | 6,73  | 4,32    |
| 21     | 7,24  | 3,37  | 9,16  | 9,67  | 6,53  | 4,83    |
| 22     | 4,58  | 4,13  | 7,64  | 7,81  | 5,54  | 7,23    |
| 23     | 10,32 | 6,73  | 8,74  | 3,86  | 7,88  | 7,16    |

|    |       |       |       |      |      |       |
|----|-------|-------|-------|------|------|-------|
| 24 | 15,09 | 5,59  | 15,37 | 4,31 | 7,63 | 4,51  |
| 25 | 13,34 | 7,15  | 12,51 | 4,44 | 5,42 | 4,80  |
| 26 | 11,56 | 7,24  | 5,98  | 4,71 | 3,35 | 7,48  |
| 27 | 4,34  | 12,15 | 5,66  | 4,12 | 4,35 | 8,01  |
| 28 | 4,15  | 10,34 | 4,37  | 3,58 | 4,30 | 4,46  |
| 29 | 10,98 | -     | 14    | 5,85 | 7,92 | 11,02 |
| 30 | 11,03 | -     | 17,33 | 8,30 | 4,62 | 13,24 |
| 31 | 11,97 | -     | 10,90 | -    | 6,97 | -     |

**Çizelge 2.** Türbinlerde rüzgâr hızına göre üretilen enerji miktarları (kW).

| Rüzgâr hızı (m/s) | Siemens SWT2.3 | VestasV112 | Nordex N100 |
|-------------------|----------------|------------|-------------|
| 0                 | 0              | 0          | 0           |
| 1                 | 0              | 0          | 0           |
| 2                 | 0              | 0          | 0           |
| 3                 | 66             | 24         | 24          |
| 4                 | 171            | 139        | 84          |
| 5                 | 352            | 312        | 212         |
| 6                 | 623            | 570        | 391         |
| 7                 | 1002           | 936        | 599         |
| 8                 | 1497           | 1419       | 912         |
| 9                 | 2005           | 2027       | 1299        |
| 10                | 2246           | 2705       | 1744        |
| 11                | 2296           | 3168       | 2149        |
| 12                | 2300           | 3292       | 2389        |
| 13                | 2300           | 3300       | 2492        |
| 14                | 2300           | 3300       | 2500        |
| 15                | 2300           | 3300       | 2500        |
| 16                | 2300           | 3300       | 2500        |
| 17                | 2300           | 3300       | 2500        |
| 18                | 2300           | 3300       | 2500        |
| 19                | 2300           | 3300       | 2500        |
| 20                | 2300           | 3300       | 2500        |
| 21                | 2300           | 3300       | 2500        |
| 22                | 2300           | 3300       | 2500        |
| 23                | 2300           | 3300       | 2500        |
| 24                | 2300           | 3300       | 2500        |
| 25                | 2300           | 3300       | 2500        |

Verilerin, yapay sinir ağları ile tasarımı ve eğitimi için MATLAB nntool kullanılarak analizi yapılmıştır. Giriş, çıkış ve test verileri Microsoft Excel programı ile oluşturulup normalizasyona tâbi tutulduktan sonra MATLAB (2019b) programında işlenmiştir. Normalizasyon, yapay sinir ağı modelinin giriş ve çıkış parametrelerine belirli ön işlemleri gerçekleştirerek yapay sinir ağları



modeline sunulmuş olan verilerin eğitiminin daha verimli hale dönüştürülmesidir. Bu araştırmada minimum–maksimum normalizasyon yöntemi uygulanmış ve modele uygulanacak tüm veriler [0,1] arasında Eş.4'e göre hesaplanmıştır.

$$X_n = \frac{(X_0 - X_{min})}{X_{max} - X_{min}} \quad (4)$$

Bu eşitlikte,  $X_n$ , normalleştirilme işlemine uygulanmış veriyi,  $X_{max}$  ve  $X_{min}$  değerleri ise veri kümesindeki maksimum ve minimum değerleri ifade eder.

**Çizelge 3.** Ay bazında 2019 rüzgâr hızlarının normalizasyon yapılmış değerleri ( $X_n$ ).

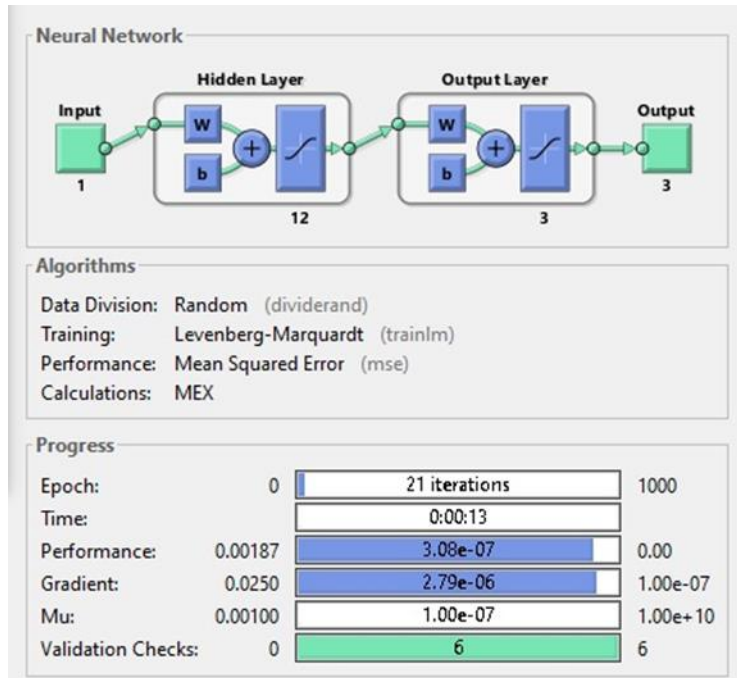
| Günler | Ocak    | Şubat   | Mart    | Nisan   | Mayıs   | Haziran |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1      | 0,62130 | 0,54122 | 0,19526 | 0,25515 | 0,80401 | 0,07976 |
| 2      | 0,41251 | 0,12814 | 0,11646 | 0,34439 | 0,76967 | 0,40379 |
| 3      | 0,85123 | 0,26613 | 0,14017 | 0,19222 | 0,17740 | 0,15753 |
| 4      | 0,59341 | 0,49821 | 0,06695 | 0,00000 | 0,36624 | 0,25623 |
| 5      | 0,40490 | 0,89427 | 0,11646 | 0,23799 | 0,73247 | 0,20339 |
| 6      | 0,34573 | 1,00000 | 0,21897 | 1,00000 | 0,83405 | 0,09970 |
| 7      | 0,09552 | 0,11649 | 0,21827 | 0,37643 | 1,00000 | 0,27019 |
| 8      | 0,57058 | 0,00000 | 0,00000 | 0,64874 | 0,33047 | 0,42871 |
| 9      | 0,30262 | 0,19713 | 0,08717 | 0,85355 | 0,04864 | 0,42373 |
| 10     | 1,00000 | 0,06989 | 0,24128 | 0,76545 | 0,46066 | 0,20638 |
| 11     | 0,89856 | 0,35036 | 0,37029 | 0,72540 | 0,08870 | 0,18046 |
| 12     | 0,37616 | 0,66308 | 0,69665 | 0,21510 | 0,08155 | 0,15254 |
| 13     | 0,02959 | 0,52778 | 0,49163 | 0,54805 | 0,02861 | 0,47757 |
| 14     | 0,48605 | 0,75806 | 0,15621 | 0,17162 | 0,30758 | 0,60718 |
| 15     | 0,92308 | 0,70341 | 0,29289 | 0,13616 | 0,32904 | 0,22732 |
| 16     | 0,84362 | 0,64516 | 0,33333 | 0,16247 | 0,07582 | 0,04786 |
| 17     | 0,18343 | 0,26971 | 0,31520 | 0,46224 | 0,75393 | 0,08873 |
| 18     | 0,00000 | 0,25717 | 0,06206 | 0,58124 | 0,24034 | 0,00000 |
| 19     | 0,07185 | 0,00538 | 0,00279 | 0,55721 | 0,17167 | 0,05384 |
| 20     | 0,22485 | 0,04301 | 0,06067 | 0,73684 | 0,48355 | 0,11067 |
| 21     | 0,31107 | 0,05287 | 0,43026 | 0,75973 | 0,45494 | 0,16152 |
| 22     | 0,08622 | 0,12097 | 0,32427 | 0,54691 | 0,31330 | 0,40080 |
| 23     | 0,57143 | 0,35394 | 0,40098 | 0,09497 | 0,64807 | 0,39382 |
| 24     | 0,97464 | 0,25179 | 0,86332 | 0,14645 | 0,61230 | 0,12961 |
| 25     | 0,82671 | 0,39158 | 0,66388 | 0,16133 | 0,29614 | 0,15852 |
| 26     | 0,67625 | 0,39964 | 0,20851 | 0,19222 | 0,00000 | 0,42572 |
| 27     | 0,06593 | 0,83961 | 0,18619 | 0,12471 | 0,14306 | 0,47856 |
| 28     | 0,04987 | 0,67742 | 0,09623 | 0,06293 | 0,13591 | 0,12463 |
| 29     | 0,62722 | -       | 0,76778 | 0,32265 | 0,65379 | 0,77866 |
| 30     | 0,63145 | -       | 1,00000 | 0,60297 | 0,18169 | 1,00000 |

|    |         |   |         |   |         |  |
|----|---------|---|---------|---|---------|--|
| 31 | 0,71090 | - | 0,55160 | - | 0,51788 |  |
|----|---------|---|---------|---|---------|--|

### 2.3. Yapay Sinir Ağının Tasarlanması

Bu kısımda, en optimal yapay sinir ağı parametrelerinin belirlenebilmesi için ağ içindeki değerler birçok kez güncellenmiş ve en az hata değerini bulan ağ parametreleri ile tahmini gerçekleştirilmiştir. Gerek kullanımdaki kolaylığı gerekse yakınsama hızı ile hem lineer hem de lineer olmayan sistemlerdeki tahmindeki kabiliyeti neticesinde ileri beslemeli geri yayılım algoritması kullanılmıştır. Excelde hazırlanmış olan veri setlerinin eğitilmesi için traininglm (Levenberg-Marquardt) algoritması seçilmiş olup, learnfnc (Adaptation Learning Function) öğrenme fonksiyonu olarak ve aktivasyon fonksiyonu için de tanjant sigmoid (tansig) fonksiyonu uygulanarak yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Performans değerlendirme için de ortalama karesel hatalar (MSE) kullanılmıştır. Tasarlanan ağ modelinde rüzgâr santrali bölgesinden elde edilen 6 aya ait günlük ortalama rüzgâr hız değerleri test verisi, rüzgâr türbinlerinin hızlara göre çıkış güçleri de hedef veri olarak ağa aktarılmıştır. Gizli katman 12 nörondan oluşacak şekilde belirlenmiştir. Modelde seçilen gizli katmanların sayısı ve gizli katmanda kaç tane nöron kullanılacağı çeşitli denemeler sonucunda bulunmuştur.

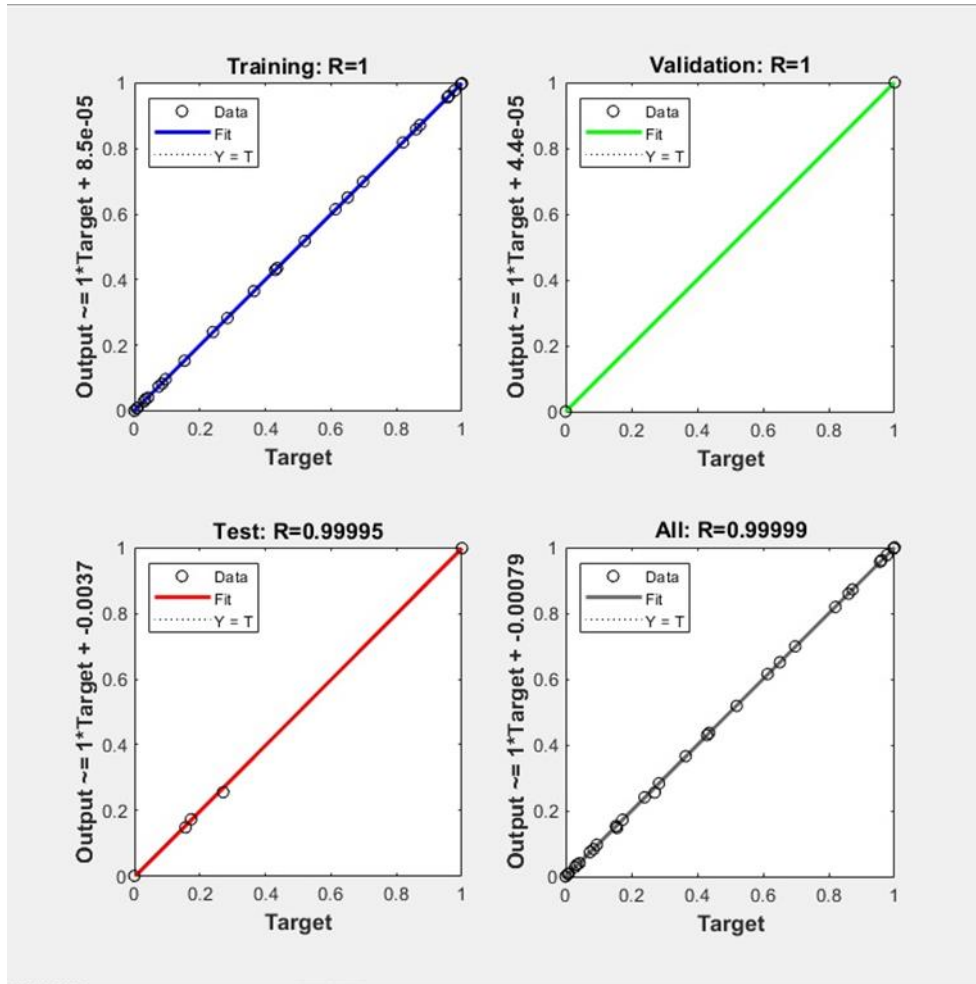
Oluşturulan yapay sinir ağı modelinde, ağ, verileri rastgele bir şekilde eğitim için %70, doğrulama için %15 ve test için %15 olarak oranlara ayırmıştır. Kullanılan nntool arayüzü ve eğitim sonucunda elde edilen veriler Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kullanılan Matlab NNTOOL program ve eğitim sonucu elde edilen veriler.

#### 2.4. Modelin Eğitimi ve Testi

Burunkaya mevki rüzgâr verileri ve türbinlerden elde edilen değerler doğrultusunda oluşturulan YSA modeli, programa aktarıldıktan sonra bu ağın eğitimine ve test kısmına geçilmiştir. Ağ eğitme, doğrulama ve test aşamasındaki ulaşmak istediğimiz nokta gerçek değerlere yakınsayabilmektir. En az hatayı veren ağırlık seçimlerinde, eğitim sonunda elde edilen doğrulama setinin hata değerleri kullanılmıştır. Test aşamasında ise ilk önce eğitim aşamasında verilen değerlerin tamamı tekrar ağa sunulur, böylelikle ağırlıklar ve giriş değerleri MATLAB programında uygulanarak en düşük hata oranı ile tahmin yapılmaya çalışılmıştır. Ağa verilen çıkışlar ile ağın eğitilmesinden sonra tahminlediği çıkış sonuçları arasındaki eğitim doğrulama ve test değerlerine ait regresyon eğrileri ise Şekil 5'te gösterilmiştir. Elde edilmiş bu grafiklere göre tüm koşullar için regresyon değerleri 1 ve 1'e yakın çıkmış yani modellenen ağın çıkış değerleri ile gerçek değerlere çok iyi bir şekilde yakınsadığı görülmüştür.



Şekil 3. Modellenen YSA'nın Eğitim, Doğrulama, Test Değerlerine Ait Regresyon Eğrileri.

### 2.5. Modellenen YSA ile Tahmini Enerji Üretim Sonuçları

Çalışmanın bu aşamasında oluşturulan YSA algoritması eğitim ve test kısımlarından sonra Afyonkarahisar ilinin Dinar ilçesine bağlı Burunkaya mevkiine ait 2019 yılı 6 Aylık periyot için günlük ortalama rüzgâr hızı değerleri baz alınarak, Siemens SWT2.3, Vestas V112, Nordex N100 model rüzgâr türbinleri kullanılması sonucunda üretilecek elektrik enerjisinin tahminlemesi amaçlanmıştır. Çizelge 4'te oluşturduğumuz yapay sinir ağında tahminlemesi yapılan rüzgâr enerjisi elektrik üretimlerinin aylara göre ağı tahmin ettiği toplam değerler verilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre bölgenin rüzgâr konusunda verimli olduğu ve uygun seçilen türbinlerle kapasite faktörü yüksek elektrik enerjisi üretiminin gerçekleştirilebileceği saptanmıştır.

**Çizelge 4.** Aylara Göre Tahmini Elektrik Enerjisi Üretim Değerleri (MW).

| Ay | Siemens SWT2.3 | Vestas V112 | Nordex N100 |
|----|----------------|-------------|-------------|
| 1  | 1171,26        | 1579,50     | 1196,59     |
| 2  | 890,87         | 1165,46     | 848,90      |
| 3  | 757,06         | 942,86      | 671,11      |
| 4  | 925,86         | 1229,06     | 905,17      |
| 5  | 977,66         | 1274,41     | 926,81      |
| 6  | 697,96         | 892,21      | 619,50      |

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan araştırmada, türbin üretici firmalardan sağlanan hız değerleri giriş katmanı ve türbin güç verileri de çıkış katmanı olarak yapay sinir ağına girilmiştir. Modellenen ağ eğitilerek elektrik enerjisi üretim tahminlemesi yapılmıştır. Oluşturulan ağdaki giriş ve çıkış değerleri ile YSA'nın tahmin ettiği nihai çıkış değerleri arasında çok yakın bir ilişki ve korelasyon olduğu Şekil 3'de verilen regresyon eğrilerinde gözlemlenmiştir. Bu durum YSA'nın iyi bir tahminleme yapabildiğini göstermektedir. Tahminleme sonucu alınan çıkış değerleri, sahadan gelen reel rüzgâr hız verileri ile MATLAB programında simüle edilmiştir. Simülasyon sonucu, YSA'nın seçilen bölgedeki veriler doğrultusunda farklı türbinlere göre yaptığı üretimler ise Çizelge.4'de verilmiştir. Eğitilen YSA ile aynı bölgede veya farklı rüzgâr verisi ile üretim tahminlemesi yapılabileceği ve rüzgâr yatırımcıları için finansman ve proje kararı verilmesi hususunda yardımcı olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışma, farklı model ve güçteki rüzgâr türbinleri ve açık deniz üzeri (offshore) rüzgâr enerjisi santralleri içinde uygulanabilir. YSA ile rüzgâr enerjisi yanında güneş enerjisi, biokütle, biyogaz ve hidroelektrik enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile de benzer çalışmalar yapılabileceği öngörülmüştür.

### KAYNAKÇA

- [1] Çalışkan, Ş. (2009). Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılık ve enerji arz güvenliği sorunu. Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, (25), 297-310.

- [2] Özgener, Ö. (2002). Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgar Enerjisi Kullanımı. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 4 (3), 159-173.
- [3] Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği, Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu 2019, Ankara, 37 syf, [https://www.tureb.com.tr/files/bilgi\\_bankasi/turkiye\\_res\\_durumu/istatistik\\_raporu\\_temmuz\\_2019.pdf](https://www.tureb.com.tr/files/bilgi_bankasi/turkiye_res_durumu/istatistik_raporu_temmuz_2019.pdf)
- [4] Chand, S. & Lan, M. (1990). Neural Network Augmented Control for Nonlinear Systems, Proc. of the 29<sup>th</sup> Conf. CDC, Honolulu, HI, 1732-1734.
- [5] Elmas, Ç. (2007). Yapay zeka uygulamaları:(yapay sinir ağı, bulanık mantık, genetik algoritma). Seçkin Yayıncılık.
- [6] Öztemel, E. (2003). Yapay sinir ağıları. PapatyaYayıncılık, İstanbul.
- [7] Sathya, R., & Abraham, A. (2013). Comparison of supervised and unsupervised learning algorithms for pattern classification. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 2 (2), 34-38.
- [8] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/693-vestas-v112-3.3>
- [9] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/647-siemens-swt-2.3-108>
- [10] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/44-nordex-n100-gamma>
- [11] <http://www.nordex-online.com/en/produkte-service/wind-turbines/n100-25-mw.html>



**ARAŞTIRMA MAKALESİ (Research Article)**

**ULTRASONİK SES DALGALARININ KÖMÜR TANE BOYUTU ÜZERİNE ETKİSİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

Uğur DEMİR

Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, [ugur.demir@dpu.edu.tr](mailto:ugur.demir@dpu.edu.tr), ORCID:  
0000.0001.8828.4711

*Geliş Tarihi: 28.02.2020*

*Kabul Tarihi: 16.07.2020*

**ÖZ**

İnsan kulağı tarafından duyulamayan, 20 kHz frekanstan daha yüksek olan sese, ultrasonik ses dalgaları denilmektedir. Ultrasonik ses dalgaları cevher ve kömür hazırlamanın birçok alanından özellikle son 10-15 yıl içerisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ultrasonik sesin kavitasyon olarak tanımlanan mekanik etkisi, başta fiziksel olmak üzere kimyasal olarak ta mineral ve kömür üzerinde etkilere neden olmaktadır. Bu çalışmada önce ultrasonik ses dalgaları ve özellikleri hakkında bilgi verilecek, ardından kavitasyon etkinin kömür (yüksek oranda pirik kükürt içeren) tane boyutu üzerinde meydana getirdiği değişimler belirtilecektir. Deneysel çalışmalarda 20kHz frekans ile çalışmakta olan 200W güce sahip prob tipi ultrasonik ses üretici kullanılmıştır. Ultrasonik ses dalgalarının farklı güç (%10-30) seviyesi ve süresinin (5-30 dakika) kömür numunesi boyutunda meydana getirdiği etki, referans tane boyutu olan 0,038 mm boyuttaki tane miktarı dikkate alınarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ayrı ayrı ve beraber değerlendirildiğinde de ultrasonik ses dalgalarının uygulama süresi ve güçteki artış tane boyutunda belirgin değişmelerin meydana gelmesine neden olduğu tespit edilmiştir. -4+2 mm tane boyutu içerisindeki -0,038 mm boyutlu malzeme miktarı ultrasonik işlemten sonra %1,86'dan %6,97'ye yükselmiştir. Yapılan mikroskobik incelemeler de ultrasonik ses dalgalarının kömür yüzeyinde yeni kırık ve çatlakların oluştuğunu göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** *Ultrasonik ses dalgaları, kömür, tane boyut değişimi*

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ULTRASONIC ENERGY ON COAL PARTICLE  
SIZE**

**ABSTRACT**

Sound that cannot be heard by the human ear, which is higher than the 20 kHz frequency, is called ultrasonic waves. Ultrasonic waves have been widely used in many areas of ore and coal preparation, especially in the last 10-15 years. The mechanical effect of ultrasonic waves, defined as cavitation, causes various effects on mineral and coal, both physical and chemical. In this study, firstly information will be given about ultrasonic waves and properties, and then the changes caused by cavitation effect on coal (included high pyritic sulfur) particle size will be specified. In experimental studies, a probe type ultrasonic wave generator with a power of 200W operating at a frequency of 20



kHz was used. The effect of ultrasonic waves at different power level (10-30%) and application time (5-30 minutes) on coal sample size was determined by considering the particle size of the reference particle size of 0.038 mm. When the obtained results were evaluated separately and together, it was found that the increase in power and application time of ultrasonic waves caused significant changes in particle size. The amount of material in the -4 + 2 mm size group increased from 1.86% before applying ultrasonic treatment to the grain size of -0.038 mm to 6.97%. Microscopic examinations also show that ultrasonic waves have formed new fractures and cracks on the coal surface.

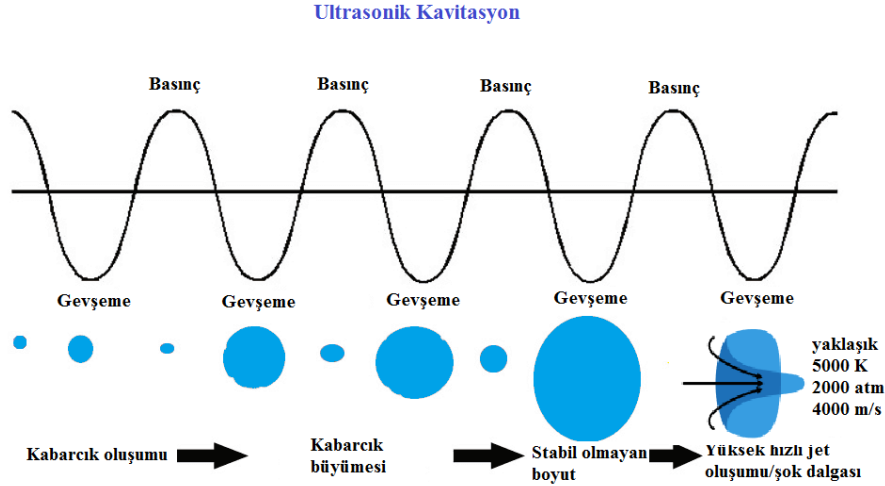
**Keywords:** *Ultrasonic wave, coal, particle size reduction*

## 1. GİRİŞ

Ultrasonik ses dalgaları, insan kulağının algılayabileceği frekanstan daha yüksek frekanstaki (> 20 kHz) ses olarak tanımlanmaktadır. Ultrasonik ses de normal ses gibi bir titreşim hareketidir. Titreşim hareketi olarak doğar, yayılır ve titreşim hareketi olarak algılanır. Bu nedenle ultrasonik ses bir mekanik enerjidir. Işık, radyo dalgaları ve x-ışınları ile birçok ortak özelliğe sahiptir. Elektriksel olarak oluşturulabilmesi, bir noktaya odaklanabilmesinin mümkün olması ortak özelliklerden bazılarıdır. En büyük farklılık ise boşlukta ilerleyememesidir, ilerleyebilmesi için hava, sıvı, katı, doku gibi bir ortam gereklidir [1-4].

Ultrasonik ses dalgaları bir sıvı ortam içerisinde kavitasyon olarak bilinen bir mekanik etki meydana getirirler. Ses titreşimleri herhangi ortam içerisinde basınç ve gevşeme evrelerinden oluşan bir dalga olarak ilerlemektedir. Ultrasonik ses dalga kaynağını, sıvı içerisine batırılmış oldukça hızlı ileri-geri hareketi olan bir pistonu benzetmek mümkündür. Bu benzerlikten basınç dalgalarının, sıvı içerisindeki molekül etkileşimler sayesinde iletilen ileriye doğru vuruş şeklinde anlatılabilir [2]. Belirtilen bu hareket 10 mikro saniyeden daha kısa bir sürede meydana gelmektedir [5].

Dalganın gevşeme kısmını üreten pistonun çekme hareketidir. Piston saniyede 20000 vuruşluk bir hızla çalıştığı zaman ortamda ultrasonik ses oluşmaktadır. Eğer gevşeme evresi yeterince güçlüyse sıvıyı bağlayan moleküller arası kuvvetleri yenecek büyüklükte negatif bir basınç oluşur. Bu durumda moleküller, ortam boyunca küçük mikro kabarcıklar oluşturmak üzere birbirlerinden ayrılır. Ultrasonik kavitasyon için gevşeme dönemini izleyen bir sıkıştırma döngüsü mevcuttur. Bu mikro kabarcıkların büyük bir miktarda enerji açığa çıkararak ani olarak patlamasına yol açar (Şekil 1). 25 °C'lik sıcaklıktaki bir suda güçlü ultrasonik ses dalgaları tarafından oluşturulan kavitasyon etkisi ile kabarcıkların çökmesi yoluyla 5000 °K sıcaklık ve 1000 atmosfer basıncına yakın basınçların oluşturulduğu, ısınma hızının 109 °K/s'den daha hızlı olduğu tahmin edilmektedir [1-3,5-13].



Ultrasonik ses dalgalarının cevher ve kömür hazırlama/zenginleştirme işlemlerinde kullanımı son 10-15 yılda belirgin bir şekilde artmış, birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [16-18]. Kömür ve cevher hazırlamada ultrasonik ses dalgaları yüzey temizleme, kırık ve çatlak oluşturma, taze yüzey meydana getirme, boyut küçültme gibi fiziksel etkiler meydana getirirken, suyun belli oranlarda moleküllerine ayrılması, birbirleri içerisinde çözünmeyen sıvıların emilasyonu ve dispersiyonu gibi kimyasal etkilere de neden olmaktadır [16-20].

Bilindiği gibi boyut küçültme işlemi kömür ve cevher hazırlamanın önemli bir bölümünü oluşturan ve üzerinde çalışmaların devam ettiği bir konudur. Boyut küçültme işlemi enerji tüketiminin en yoğun olduğu uygulamadır, enerji tüketiminin düşürülebilmesini sağlayan birçok ön işlem laboratuvar ve endüstriyel ölçüde uygulanmaya devam edilmektedir. Bu ön işlemler; ısı işlem, mikrodalga ile ısı işlem, ultrasonik ses dalgaları ve termal şok olarak sıralanabilmektedir [4].

Ultrasonik ses dalgalarının kaviteasyon etkisinin meydana getirdiği kırık ve tane boyutundaki küçülmenin dört aşamada meydana geldiği, bunlar sırasıyla kömür yüzeyindeki aşınma, kömür yüzeyinde çatlak/kırık oluşumu, kırık ve çatlakların genişlemesi ve derinleşmesi, kömür taneciğinin kırılması olarak belirtilmektedir [19-21]. Ultrasonik ses dalgalarının üretildiği frekans aralığı tanelerin üzerine uygulanan mekanik ve kimyasal etkinin şiddetini etkilemektedir. Düşük frekanslarda (25 kHz) tane boyutunun küçülmesine neden olan kuvvetli mekanik etki ön plana çıkarken, yüksek frekanslarda (430 kHz) mekanik etki azalmakta, kimyasal etki önemli oranda artmaktadır[22].

Ultrasonik ses dalgalarının boyut küçültme amaçlı kullanım 1950'li yıllarda başlamış, ilk olarak Gartner (1953) [23] ultrasonik ses dalgalarının boyut küçültmeye olan etkisini araştırmış fakat etkinin düşük seviyelerde kaldığını belirtmiştir. Daha sonra Fleischhauer ve Kröger (1969) [24] süspansiyon içindeki kömür tanelerinin ultrasonik ses dalgası ile boyutunun küçültülmesini incelemiştir. Graff (1979) [25] ise çoklu kademe stamp değirmene ultrasonik ses üreteçleri ilave ederek öğütmeye etkileri incelemiştir. Bunlar gibi çok sayıda çalışma ultrasonik ses dalgalarının boyut küçültmeye olan etkilerini incelemektedir.

Şahinoğlu ve Uslu (2013) [20] Artvin-Muzret kömürleri ile yapmış oldukları çalışmada ultrasonik ses dalgalarının kömür tane boyutunda meydana getirdiği değişimi belirlemişler, ultrasonik ses dalgalarının kaviteasyon etkisi kırma, çatlatma ve yarık oluşturma gibi etkilerinin olduğunu belirtmişlerdir. Aynı yazarların başka bir çalışmasında (2015) [21] artan ultrasonik ses gücü ile tane boyutundaki azalma arasında bir ilişki olduğunu, 53 mikrometrelik referans tane boyutunu dikkate alarak göstermişlerdir. Ambedkar ve diğ. (2011b) [22] Hindistan kömürleri üzerinde yaptıkları çalışmada, ultrasonik ses dalgalarının kömürden kükürt uzaklaştırmada ultrasonik ses dalgalarının liç işlemi sırasında kullanılması durumunda tane boyutunda meydana gelen değişimi tespit etmişlerdir. Düşük frekanslarda tane boyutunda daha yüksek oranda değişim meydana gelirken, yüksek frekanslarda kimyasalın kömür tanecikleri içerisine daha etkili bir şekilde nüfuz ettiğini belirlemişlerdir. Yüksek ve düşük frekanslı ses dalgalarını eş zamanlı kullanarak hem tane boyutunda küçülmenin hem de kimyasal difüzyonunun yüksek oranda gerçekleşmesini sağlamışlardır. Kang ve diğ. (2008) [26] Çin Xiazhuang kömürlerinden kükürt uzaklaştırma çalışmalarında ultrasonik ses dalgalarını kullanmış, ultrasonik ses dalgalarının tane boyutunda meydana getirdiği değişim tespit edilmiştir. Farklı boyut gruplarındaki kömür numunelerine uygulanan ultrasonik ses dalgaları, iri boyutlarda daha etkili olurken, ince tane boyutlarında meydana gelen kırılma daha sınırlı seviyelerde kaldığı ifade edilmektedir. Raman ve diğ. (2008 ve 2011) [27-28] yapmış oldukları her iki çalışmada ultrasonik ses dalgalarının Alüminyum oksit tanelerinin boyutlarında meydana getirdiği değişim incelenmiş, ultrasonik ses dalgası gücü, uygulama süresi ve tane boyutunun etkileri araştırılmıştır. Artan güç ve sürenin tane boyutunda meydana getirdiği değişim hem deneysel hem de teorik olarak ortaya konulmuştur. Garretton ve diğ (2000) [29] yüksek basınçlı merdaneli değirmeni modifiye ederek ultrasonik ses dalgalarından yararlanmış, merdanelerin birine ultrasonik ses üretici ekleyerek aktive etmiş ve boyut küçültmeye olan etkilerini incelemişlerdir. Ultrasonik ses dalgalarının boyut küçültme işleminde daha düşük enerji tüketimine neden olduğu belirtilmektedir.

Bu çalışmada, ultrasonik ses dalgalarının yüksek oranda piritik kükürt içeren kömürlerin tane boyutunda meydana getirdiği değişim incelenmiş, değişimin belirlenmesine yönelik olarak önce belli bir tane boyutunun altındaki kömür numunelerine, daha sonra farklı boyut gruplarına ayrılmış kömür numunelerine, farklı güç (%10-30) ve sürelerde (5-30 dak) uygulanan ultrasonik ses dalgalarının etkileri incelenmiştir. Alt bitümlü kömür grubunda olan ve kırılma bir yapı sergileyen Gediz yöresi kömürleri ayrıca oldukça ince boyutta serbestleşen piritik kükürt (%3,55) içermektedir, bu özellikteki kömürler üzerinde ultrasonik ses dalgalarının incelendiği çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Boyutta meydana gelen değişimin belirlenmesi amacıyla literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak 38 mikrometre tane boyutu referans boyut olarak belirlenmiştir. Ultrasonik ses öncesi ve sonrasında elde edilen ürünlerin -38 mikrometre boyutlu malzeme miktarları belirlenmiştir. Ayrıca bu işlem sonunda elde edilen kömür numunelerinin mikroskopik incelemeler sonucu yüzeylerinde meydana gelen değişim ile birlikte kül ve kükürt oranları karşılaştırılarak kısmi zenginleştirme olup olmadığı belirlenmiştir.

## **2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Malzeme**

Deneysel çalışmalarda kullanılan yüksek oranda kükürt içeren kömür numuneleri, Kütahya-Gediz-Gökler kasabasında faaliyet gösteren özel bir şirkete ait kömür ocağından alınmıştır. Temsili olarak alınan kömür numuneleri deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere boyut küçültme işlemine tabi tutulmuş (-4 mm), uygun yöntemler ile azaltılmış ve özelliklerinin değişiminin engellenmesi

amacıyla hava geçirmez kilitli poşetlerde saklanmıştır. Gediz yöresi kömürleri üzerinde yapılan analizlerden %3,3 toplam nem, %25,99 kül, %32,81 uçucu madde ve %37,90 sabit karbon içerdiği belirlenmiştir. Alt ısı değeri 5607 kcal/kg olan kömür numunesi %7,06 toplam kükürt (%3,55 piritik kükürt) içermektedir.

DeneySEL çalışmalarda kullanılan temsili kömür numuneleri laboratuvara getirildikten sonra çeneli kırıcıda iki kademe olarak kırılmış ve farklı boyut gruplarına ayrılmıştır. Tane boyutuna bağlı olarak kül ve kükürtte meydana gelen değişim Çizelge 1’de verilmiştir. Kül analizi Nüve marka MF120 kül fırınında, kükürt analiz ise Leco marka SC144 DR model kükürt-karbon cihazında standartlara uygun olarak yapılmıştır. Çizelgeden de görüldüğü gibi tane boyutuna bağlı olarak kül oranında belirgin bir artış meydana gelirken, kükürt oranlarından çok belirgin bir değişim görülmemektedir. Bu durum kömür numunesi bünyesinde bulunan killi yapıların boyut küçültme işlemi sırasında dağılarak daha ince boyutta birikmesi ve yapılan mikroskobik incelemeler sonucu piritik kükürdün oldukça ince boyutta (5-20  $\mu\text{m}$ ) olmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan minerolojik incelemelerden kömür numunesi içerisinde piritle beraber kuvars ve kalsitin varlığı tespit edilmiş, ikincil olarak kaolin, illit, dolomit, jibs ve markasit varlığı belirlenmiştir.

**Çizelge 1.** Ocaktan alınan temsili kömür numunesinin tane boyut dağılımı ve boyuta bağlı olarak kül, kükürt ve ısı değeri analizleri.

| Tane Boyutu (mm) | Miktar (%) | Kül (%) | Toplam Kükürt (%) | Alt Isıl Değer (Kcal/kg) |
|------------------|------------|---------|-------------------|--------------------------|
| +63              | 11.51      | 19.51   | 6.90              | 6237                     |
| -63+31.5         | 18.31      | 25.21   | 7.42              | 5683                     |
| -31.5+16         | 22.95      | 25.20   | 6.93              | 5685                     |
| -16+12.5         | 4.37       | 24.48   | 7.08              | 5754                     |
| -12.5+4          | 24.04      | 23.97   | 7.35              | 5803                     |
| -4+2             | 8.86       | 26.80   | 6.62              | 5529                     |
| -2+1             | 4.64       | 35.50   | 6.68              | 4684                     |
| -1               | 5.32       | 46.85   | 6.42              | 3582                     |
| Toplam           | 100        | 25.99   | 7.06              | 5607                     |

Tüvenan kömür numunesi son olarak 4 mm altına kırılmış ve elde edilen ürünlerin boyut dağılımına bağlı olarak -0,038 mm boyutlu malzeme oranı sulu eleme yapılarak belirlenmiş ve çizelge 2’de verilmiştir. Çizelge 2’den de görüldüğü gibi iri boyutlu malzeme içerisinde eleme işleminden kaynaklanan ve kömürün özellikleri nedeniyle kalan -0,038 mm boyutlu malzeme miktarı bulunmakta fakat oldukça düşük seviyelerdedir (%1,86). Tane boyutu küçüldükçe içerdikleri -0,038 mm malzeme miktarında belirgin artışlar meydana gelmekte fakat yine düşük seviyelerde kalmıştır. En küçük tane boyutu olan -0,25 mm içerisinde önemli oranda -0,038 mm malzeme olduğu görülmektedir (%20,08).

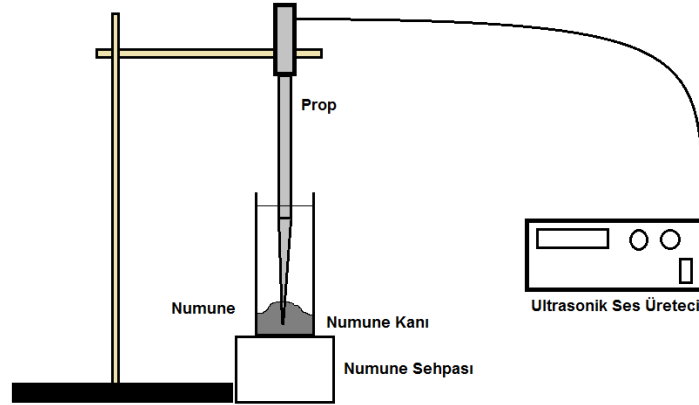
**Çizelge 2.** Farklı boyut gruplarındaki kömür numunelerinin içerdiği -0,038 mm boyutlu malzeme oranları.

| Tane Boyutu (mm) | -0,038 mm tane oranı (%) |
|------------------|--------------------------|
| -4+2             | 1,86                     |
| -2+1             | 4,38                     |
| -1+0,5           | 5,09                     |

|           |       |
|-----------|-------|
| -0,5+0,25 | 12,12 |
| -0,25     | 20,08 |
| Toplam    | 43,53 |

## 2.2. Yöntem

5 gr temsili kömür numunesi 10 ml su ile karıştırıldıktan sonra farklı ultrasonik ses dalgası güç (%10-30) ve sürelerinde (5-30 dak) işleme tabi tutulmuş (Şekil 2), işlem sonrasında 38 mikrometrelik elekte yaş yöntem kullanılarak elenmiştir. Ultrasonik öncesi ve sonrasındaki tane boyutunda meydana gelen değişim incelenmiştir. Tane boyutunda meydana gelen değişimin yanı sıra kömürün kül ve kükürt içeriklerinde meydana gelen değişimde takip edilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik görünüşü.

Deneysel çalışmalarda etkisi araştırılan ultrasonik ses dalgaları Bandelin marka HD2200 model cihaz ile elde edilmiştir. Cihaz 20kHz frekans ile çalışmakta ve 200W güce sahiptir. Cihazın gücü %-100 arasında ayarlanabilmektedir. Cihaz üzerine farklı çaplarda titanyum proplar takılabilmekte, bu çalışma sırasında 3 mm çaplı titanyum prob kullanılmıştır.

Ultrasonik ses dalgalarının iki temel etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bunlardan birincisi ultrasonik ses dalgalarının kaviteasyon etkisi ile kömür tanecikleri üzerinde yeni kırık ve çatlaklar oluşturması, buna bağlı olarak da tane boyutunda meydana gelen değişim. Diğer ise kül yapıcı mineral maddeler ve piritik kükürtte meydana gelen değişimlerdir. Yapılan mikroskobik incelemelerde Gediz yöresi kömürleri, oldukça ince boyutta dağılmış kil mineralleri ve piritik kükürt tanecikleri içermektedir. Ultrasonik ses dalgalarının kaviteasyon etkisi ince boyuttaki inorganik yapıların kömür maktirksi içerisinde buldukları yerden çıkmasına neden olabilmektedir. Ayrıca mikroskobik incelemeler ile iri boyuttaki kömürlerin yüzeylerinde meydana gelen değişimlerde (kırık ve çatlak) tespit edilmeye çalışılmıştır.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

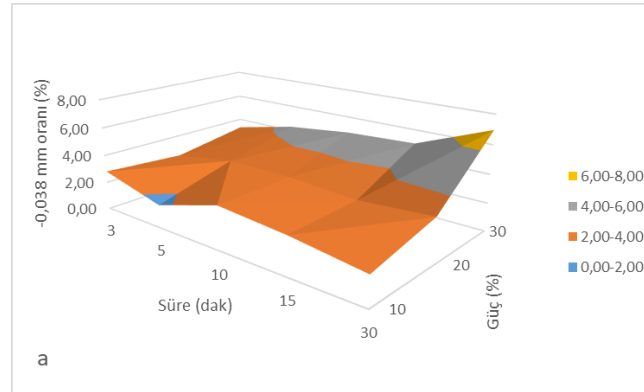
İlk olarak her bir tane boyut aralığındaki malzemeler 0,038 mm elekten yaş olarak elenerek, her boyuttaki -0,038 mm tane boyutundaki malzeme oranı tespit edilmiştir (Çizelge 3). Daha sonra

yöntem kısmında da belirtildiği gibi kömür numuneleri farklı güç ve sürelerde ultrasonik ses dalgalarına maruz bırakılmış ve tane boyutunda meydana gelen değişim belirlenmiştir.

**Çizelge 3.** Farklı tane boyutundaki kömür numunelerinin kül, kükürt ve -0,038 mm boyutlu malzeme oranları.

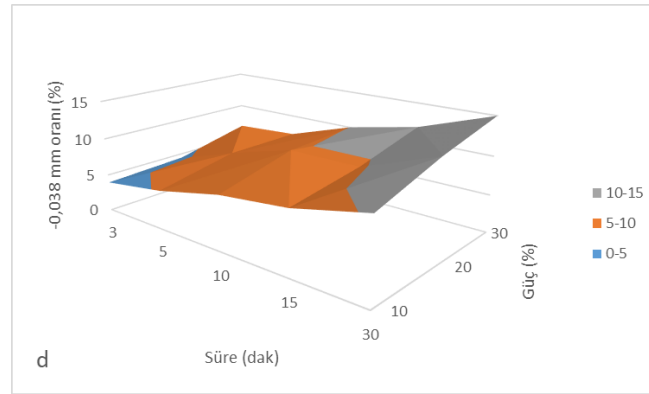
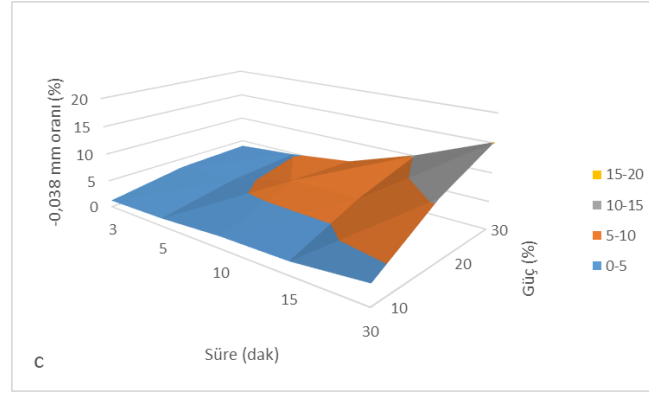
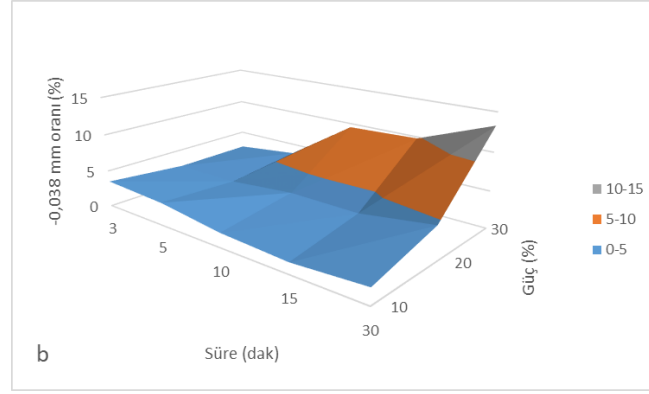
| Tane Boyutu (mm) | Kül oranı (%) | Kükürt oranı (%) | -0,038 mm tane oranı (%) |
|------------------|---------------|------------------|--------------------------|
| -4+2             | 26,80         | 6,62             | 1,86                     |
| -2+1             | 35,50         | 6,68             | 4,38                     |
| -1+0,5           | 46,85         | 6,42             | 5,09                     |
| -0,5+0,25        | 51,20         | 6,72             | 12,12                    |
| -0,25            | 61,40         | 6,88             | 20,08                    |
| Besleme          | 25,99         | 7,06             | 43,53                    |

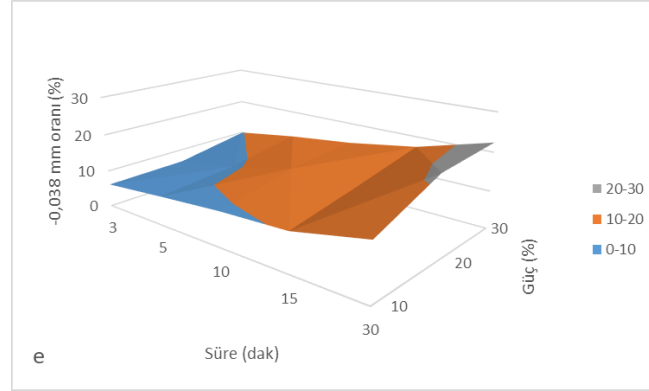
Farklı tane boyutlarındaki (-4+2, -2+1, -1+0.5, -0.5+0.25, -0.25 mm) kömür numunelerine uygulanan ultrasonik ses dalgalarının güç ve süreye bağlı olarak -0,038 mm tane boyutu miktarında meydana gelen değişimler aşağıdaki Şekil 3’de verilmiştir.





Demir, U., *Journal of Scientific Reports-B, Sayı 2, 39-54, Aralık 2020.*  
Demir, U., *Journal of Scientific Reports-B, Number 2, 39-54, December 2020.*





**Şekil 3.** Farklı tane boyutlarındaki numunelere uygulanan ultrasonik güç ve sürenin etkisi (a: -4+2 mm, b: -2+1 mm, c: -1+0,5 mm, d: -0,5+0,25 mm, e: -0,25 mm).

Ultrasonik ses dalgaları, sıvı ortamdaki ilerleme hızı oldukça yüksek olduğu için, oluşum ve ilerleme aşamasında meydana gelen mekanik etkiler (kavitasyon) süspansiyon içerisindeki katı taneler üzerinde önemli deformasyonlara neden olmaktadır. Yapılan çalışmalar süspansiyon içerisindeki katı tanelerin sertlik ve kırılmalık özelliklerine göre daha fazla veya daha düşük oranlarda deformasyona uğradığını göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan kömür numunesi yapı itibarıyla sıkı ve kırılmalık bir özellik taşımaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan kömür numuneleri üzerine uygulanan mekanik (ufalama) etkiler kömür taneciklerinin köşeli kırılmasına ve ince boyutlarda ürün oluşturulmasına neden olmaktadır. Kömür numunesi yapılan mikroskobik incelemelerde ince dağılmış halde pirit tanecikleri içermekte, bu pirit tanecikleri uygulanan mekanik kuvvet etkisi ile kömür bünyesi içerisinde daha ince boyutlara ayrıldığı gözlemlenmiştir. Tane boyutu küçüldükçe mekanik etkiler ile serbest hale gelen pirit taneciklerinin önemli oranda artmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

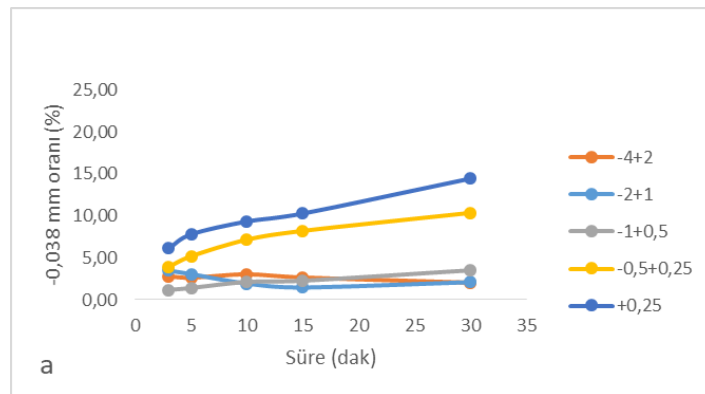
Şekil 3'deki grafikler incelendiğinde ultrasonik ses dalgalarının güç ve uygulama süresinin -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarındaki değişim net bir şekilde görülmektedir. İri tane boyutundaki numunede düşük güç seviyelerinde artan süreye bağlı olarak çok önemli bir değişim meydana gelmez iken güç arttıkça süreye bağlı olarak -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarı belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Daha önceden yapılmış çalışmalar incelendiğinde iri tane boyutlarında ultrasonik ses dalgalarının daha yüksek oranda hem yüzeyde hem de tane boyutunda belirgin değişimlerin meydana gelmesine neden olduğu ifade edilmektedir. Ultrasonik ses dalgalarının malzeme üzerine uygulandığı güç ve süre boyutunda ve yüzeyde meydana gelecek deformasyonları ciddi şekilde etkilemektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçları destekler niteliktedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kömür numunesinin iri tane boyutlarına uygulanan düşük ultrasonik güç seviyelerinde önemli değişimlerin meydana gelmediğini görülmektedir. Güç seviyesi ve süre artışı kömür numuneleri içerisindeki -0,038 mm boyutlu malzeme miktarında sürekli olarak bir artışın meydana gelmesine neden olmaktadır. -4+2 mm boyut grubunda ultrasonik işlem görmemiş numune içerisindeki -0,038 mm boyutlu malzeme miktarı sırasıyla %1,86 iken 30 dakikalık ultrasonik işlem sonrasında -0,038 mm boyutlu malzeme miktarı sırasıyla %10 güç seviyesinde %2,07, %20 güçte %3,15 ve %30 güçte %6,97'ye çıktığı belirlenmiştir. -2+1 mm boyut grubunda bu oranlar %4,57 ve %13,31 olmakta iken, -1+0,5 mm boyut grubunda ise %10,54 ve %15,19 olmuştur.

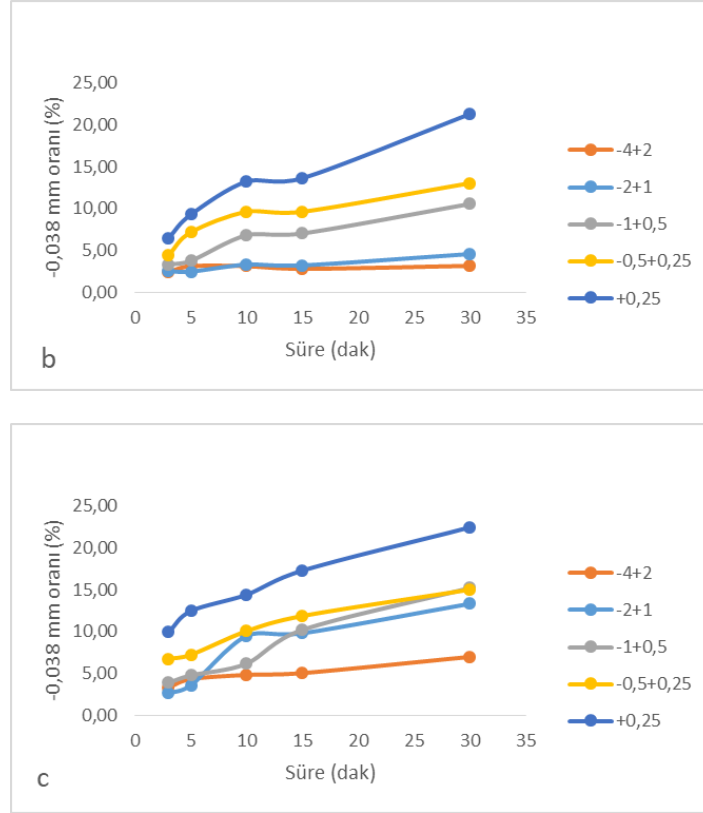
Tane boyutu daha düşük seviyelere indikçe, özellikle -2+1 ve -1+0,5 mm boyutlarda düşük güç seviyelerinde -0,038 mm boyutlu malzeme miktarı hemen hemen sabit kalmakta, güç ve süre artışının beraber olduğu durumlarda bu miktar belirgin şekilde artmaktadır.

-0,5+0,25 ve -0,25 mm tane boyutlarındaki kömür numunelerine uygulanan ultrasonik ses dalgaları, düşük güç seviyelerinden başlayarak -0,038 mm boyutlu malzeme miktarında belirgin artışların olduğunu göstermektedir. Bu durum ince boyutlarda kısmi olarak serbestleşebilen pirit ve killi mineral içeren parçalardan ultrasonik ses dalgaları ile bu piritli ve killi parçaların ayrışarak daha yüksek oranda -0,038 mm boyutlu tane miktarı oluşturmaktadır.

Artan ultrasonik ses dalgası gücü ve süresi, pülp sıcaklığının da kademeli ve sürekli olarak artmasına neden olmaktadır. Deneysel çalışmalar sırasında yapılan sıcaklık ölçümleri incelendiğinde ilk 20 dakikalık süre içerisinde sıcaklık sürekli olarak artmakta (%30 ultrasonik güç ve 30 dakikalık işlem süresinde sıcaklık 70,3 °C'ye kadar yükselmekte), daha sonra kademeli olarak yatay bir seyir izlediği görülmektedir. Sıvı ortamın sıcaklığının artması, ultrasonik ses dalgalarının oluşturduğu kavitasyon kabarcıklarının (mekanik etkinin) kömür tane boyutunda meydana getirdiği değişim artmakta ve bu durum çeşitli araştırmacılar [21,28,30] tarafından şöyle açıklanmaktadır. Ultrasonik ses dalgalarının sıvı ortam içerisindeki kavitasyon etkisi, içerisinde olduğu sıvının sıcaklığı, yüzey gerilimi, viskozitesi ve buhar basıncı ile yakından ilişkilidir. Sıvı ortam sıcaklığı, ultrasonik ses dalgalarının neden olduğu kavitasyon eşiğinin azalmasına neden olmaktadır. Kavitasyon eşiği, kavitasyon kabarcıklarının oluşması için gerekli olan şart olarak ifade edilmektedir. Sıvı ortamın sıcaklığı arttıkça, buhar basıncı artmakta, bununla beraber sıvının yüzey geriliminde de bir azalma meydana gelmektedir. Hem buhar basıncının artması, hem de yüzey geriliminin düşmesi, kavitasyon eşiğinin azalmasına yani kavitasyon kabarcıklarının daha kolay ve şiddetli oluşmasına neden olmaktadır. Sıvı ortamın sıcaklığının artmasına paralel olarak viskozitede de belirgin oranda azalma meydana gelmektedir. Kavitasyon kabarcıklarının daha kolay oluşması sıvı ortam içerisinde bulunan katı taneciklerin ufalanma/boyut küçülmesine yani tanecikler üzerinde meydana gelen deformasyonun artmasına neden olmaktadır. Ultrasonik ses dalgalarının sıvı ortam içerisinde uzun süre uygulanması kademeli ve sürekli olarak sıcaklığın artmasına da neden olduğu belirlenmiştir.

Herbir ultrasonik güç seviyelerinde (%10, 20 ve 30), tane boyutunda süreye bağlı olarak, uygulama süresi de dikkate alınarak -0,038 mm tane boyutlu malzeme miktarındaki değişim Şekil 4'de verilmiştir. Bu grafiklerden ikili değişimler (süre-tane boyutu) çok daha net görülmektedir.

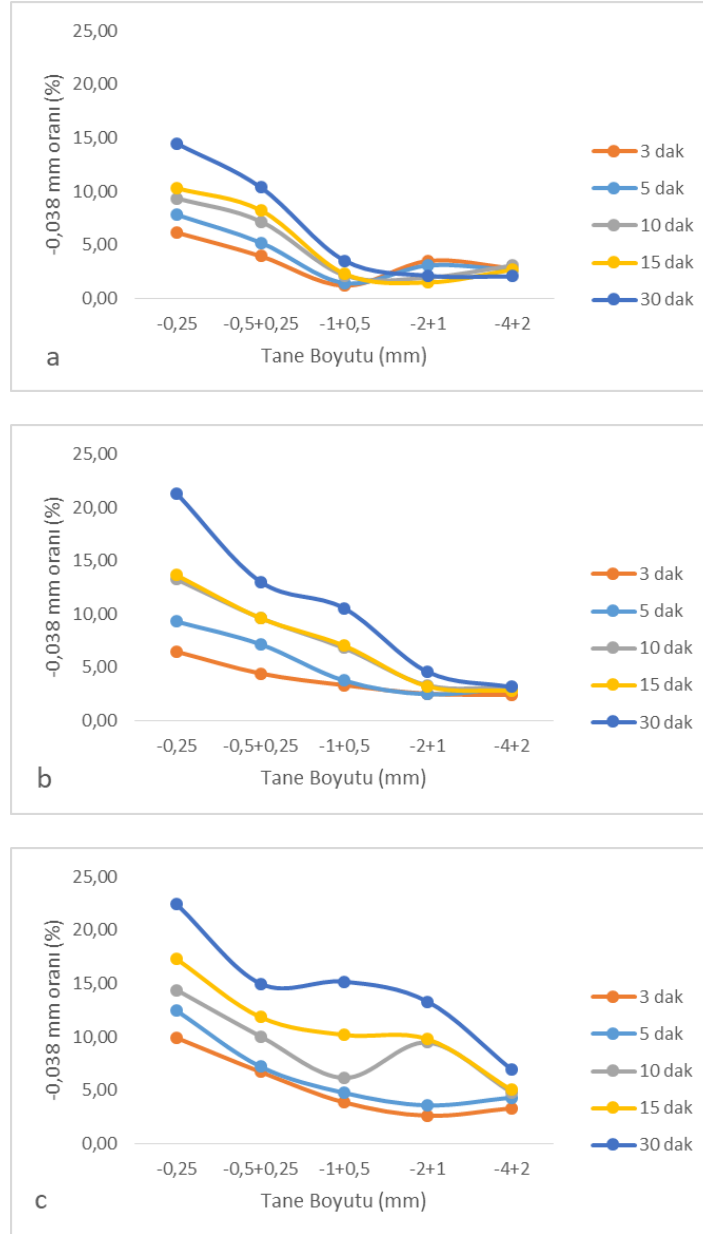




**Şekil 4.** Tane boyutuna bağlı olarak farklı ultrasonik güç seviyelerinin uygulama süresine bağlı olarak etkisi (a: %10, b: %20, c:%30).

Farklı tane boyutundaki kömür numunelerine uygulanan sabit ultrasonik güç seviyesinde -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarındaki değişim incelendiğinde, en düşük güç seviyesi olan %10 güçte (Şekil 4a) nisbeten iri boyutlarda (-4+2, -2+1 ve -1+0.5 mm) belirgin bir değişim tespit edilemezken, ince boyutlarda -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarında uygulama süresine bağlı olarak belirli oranda artışın olduğu görülmektedir. Güç seviyesi %20'ye çıkarıldığında, bu sefer -4+2 ve -2+1 mm boyut gurunda önemli bir değişim meydana gelemez iken diğer boyutlardaki -0,038 mm tane miktarında önemli artışların olduğu görülmektedir. Ultrasonik ses dalgalarının güç seviyesi %30'a çıkarıldığında ise tüm boyutlardaki -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarında çok belirgin değişimlerin olduğu görülmektedir. Bu durum ultrasonik güç ve uygulama süresi ile de bağlantılı olarak değişmektedir. Ultrasonik ses dalgalarının etkisi artan uygulama süresi ile birlikte sürekli olarak artmakta, bu etki -0,038 mm boyutlu malzeme miktarında da sürekli olarak bir artışın olmasına neden olmaktadır. Ultrasonik ses dalgalarının oluşturduğu kavitasyon etkisi, sıvı ortam içerisindeki kömür tanelerinin yüzeyleri üzerinde önemli deformasyonlara neden olmakta, yeni kırık ve çatlak oluşturmakta, oluşan bu kırık ve çatlakların derinleşmesine daha sonra da taneciklerin boyutlarında belirgin değişimlerin olmasına neden olmaktadır. Kömür tanecikleri ve içerdiği inorganik maddeleri birbirine bağlayan kuvvetler, ultrasonik ses dalgalarının etkisi ile zayıflatılmakta, bir çoğu da kırılarak boyutta belirgin değişimlerin meydana gelmesine neden olmaktadır.

Son olarak da farklı güç seviyelerinin tane boyutuna bağlı olarak farklı sürelerde meydana getirdiği değişimlerin daha net olarak görülmesi için sonuçlar Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Aynı tane boyutunda ultrasonik ses dalgalarının farklı sürelerdeki etkileri (a: %10, b: %20, c: %30).

Şekil 5 incelendiğinde en düşük güç seviyesi olan %10 güç seviyesinde iri tane boyutlarındaki (-4+2, -2+1, -1+0.5) -0,038 mm boyutlu malzeme miktarında belirgin değişimler meydana gelmez iken, ince boyutlarda (-0,25 ve -0,5+0,25 mm) ultrasonik ses dalgalarının uygulama süresi ile birlikte -0,038 mm tane boyutlu malzeme miktarında sürekli olarak bir artışın meydana geldiği görülmektedir. %20 ve %30 ultrasonik güç seviyelerinde yine artan süreye bağlı olarak tüm tane boyutlarındaki -0,038 mm boyutlu malzeme miktarında çok belirgin değişimler meydana gelmektedir. En ince tane boyutu (-0.25 mm) ve en yüksek güç seviyelerinde (%30) en yüksek oranda -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum yine ultrasonik ses dalgalarının kaviteasyon etkisi sonucu oluşan mekanik etkinin taneciklerin hem yüzeylerinde hem de boyutlarında belirgin değişimlerin/deformasyonların oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca kömür numunelerinin içerdiği ve çok ince boyutta serbestleşen killi yapılar, ultrasonik ses dalgalarının etkisi ile buldukları yerden çıkmakta ve -0,038 mm boyutlu malzeme olarak ayrılmaktadırlar.

#### **4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Ultrasonik ses dalgaları cevher ve kömür hazırlamanın birçok aşamasında kullanılmaya başlanmış, elde edilen sonuçlardan önemli iyileştirmelere neden olduğu belirlenmiştir. Ultrasonik ses dalgalarının özellikle kaviteasyon etkisi, hem fiziksel hem de kimyasal olarak önemli etkilere neden olmaktadır. Bu çalışmada yüksek oranda piritik kükürt içeren kömür tanecikleri üzerine uygulanan ultrasonik ses dalgasının boyut dağılımına olan etkileri incelenmiş, elde edilen sonuçlar literatürdeki verileri destekler nitelikte kömür tane boyutunun belirli oranda azaldığını göstermektedir. Ayrıca alt bütümlü kömür sınıfında ve kırılğan bir özelliği olan yöre kömürleri üzerine ultrasonik ses dalgalarının etkisinin incelendiği tek çalışma niteliğindedir. Kömür bünyesinde ince boyutlarda dağılmış vaziyette bulunan piritik kükürt, ultrasonik ses dalgalarının etkisi ile yerlerinden çıkmış ve -0,038 mm boyutlu malzeme içerisine karışmıştır.

Farklı ultrasonik güç (%10, %20 ve %30) ve uygulama süresinin (5-30 dakika) sıvı ortam içerisindeki katı taneciklerinin hem yapısal hem de yüzeysel deformasyonlara neden olduğu yapılan mikroskopik incelemelerde belirlenmiştir. Artan ultrasonik güç ve uygulama süresine bağlı olarak numune içerisindeki -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarı önemli oranda artmıştır. En yüksek ultrasonik gücü ve uygulama süresinde yapılan deneyler sonucunda -4+2, -2+1, -1+0.5, -0.5+0.25 ve -0.25 mm tane boyutlarındaki kömür numunelerindeki -0,038 mm tane boyutundaki malzeme oranları sırasıyla %1.86, %4.38, %5.09, %12.12 ve %20.08'den %6.97, %13.31, %15.19, %15.00 ve %22.43 yükselmiştir. Bu sonuçlar ultrasonik ses dalgalarının Gediz yöresi kömürlerinin tane boyutunda belirgin değişimlerin meydana gelmesine neden olduğu tespit edilmiştir.

Farklı ultrasonik güç ve sürelerde uygulanan işlem, kömür numunelerinde bulunan ve serbestleşme boyutu oldukça küçük olan killi ve piritik kükürt taneciklerinin (5-20 µm) buldukları yerden çıkmasına ve -0,038 mm boyutlu malzeme içerisine karışmasına neden olmaktadır. Deneysel çalışmalar sırasında yapılan kül ve kükürt analizler de bu durumun ortaya çıktığını göstermektedir. Ultrasonik ses dalgaları ile yapılan bu işlem kısmi zenginleştirmeye neden olduğu belirlenmiş, çalışmanın bir sonraki aşamasında meydana gelen bu kısmi zenginleştirme incelenecektir.

#### KAYNAKÇA

- [1] Pestic B., (1996), Application of ultrasound in solvent extraction of nickel and gallium, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, Idaho
- [2] Alp İ., (1998), Yüksek frekanslı ses dalgalarının cevher zenginleştirmede kullanılabilirliğinin araştırılması, Doktora tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir
- [3] Önal G., Özer M., Arslan F., (2003), Sedimentation of clay in ultrasonic medium, Minerals Engineering, vol:16, pp129-134
- [4] Aditya S., Nandi Tapas K., Pal Samir K., Majumder Arun K. (2017), Pre-treatment of rocks prior to comminution – A critical review of present practices, International Journal of Mining Science and Technology 27 339–348
- [5] Kyllönen, H. Pirkonen, P. Hintikka, V. Parvinen, P. Grönroos, A. Sekki, H. (2004), Ultrasonically aided mineral processing technique for remediation of soil contaminated by heavy metals, Ultrasonics Sonochemistry 11 211–216
- [6] Teipel, U. Leisinger, K. Mikonsaari I. (2004), Comminution of crystalline material by ultrasonics, Int. J. Miner. Process. 74S p183–190
- [7] Suslick K. S., Price G. J., (1999), Application of ultrasound to materials chemistry, Annual Reviews Materials Science, vol:29, pp295-326
- [8] Farmer A.D., Collings A.F., Jameson G.J., (2000), Effect of ultrasound on surface cleaning of silica particles, International Journal of Mineral Processing, vol:60, pp101-113
- [9] Farmer, A.D. Collings, A.F. Jameson, G.J. (2000), The application of power ultrasound to the surface cleaning of silica and heavy mineral sands, Ultrasonics Sonochemistry 7 243–247
- [10] Kang W., Xun H., Kong X., Li M. (2009), Effects from changes in pulp nature after ultrasonic conditioning on high-sulfur coal flotation” Mining Science and Technology 19 0498–0502
- [11] Küncekk, İ. Sener S. (2010), Adsorption of methylene blue onto sonicated sepiolite from aqueous solutions, Ultrasonics Sonochemistry 17 250–257
- [12] Bang, J., H., ve S. Suslick K., S., (2010), Applications of Ultrasound to the Synthesis of Nanostructured Materials, Adv. Mater. 22, 1039–1059
- [13] Seidi, S., Yamini Y., (2012), Analytical sonochemistry; developments, applications, and hyphenations of ultrasound in sample preparation and analytical techniques, Cent. Eur. J. Chem.10(4) 938-976
- [14] Leonelli, C. Mason, T.J. (2010), Microwave and ultrasonic processing: Now a realistic option for industry, Chemical Engineering and Processing 49 885–900



- [15] Turan Ö., (2007), Boraks çözeltilerinden probertit çökmesine ultrases dalgalarının etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [16] Mao Y., Xia W., Peng Y., Xie G., (2019), Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review, *Fuel Processing Technology* 195 106150
- [17] Mao Y., Chen Y., Bu X., Xie G., (2019), Effects of 20 kHz ultrasound on coal flotation: The roles of cavitation and acoustic radiation force, *Fuel* 256 115938
- [18] Demir U., (2019) Ultrasonik ses dalgalarının gümüş liçi performansına etkisinin araştırılması, DPU Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, Proje No: 2016-60, Proje Sonuç Raporu
- [19] Ambedkar B., Nagarajan R., Jayanti S., (2011), Investigation of high-frequency, high-intensity ultrasonics for size reduction and washing of coal in aqueous medium, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 50 13210–13219.
- [20] Şahinoğlu, E., Uslu, T., (2013), Increasing coal quality by oil agglomeration after ultrasonic treatment, *Fuel Processing Technology* 116 332–338
- [21] Şahinoğlu, E., Uslu, T., (2015) Effects of various parameters on ultrasonic comminution of coal in water media, *Fuel Processing Technology* 137 48–54
- [22] Ambedkar, B. Chintala, T.N. Nagarajan, R. Jayanti, S. (2011), Feasibility of using ultrasound-assisted process for sulfur and ash removal from coal, *Chemical Engineering and Processing* 50 236–246
- [23] Gartner W. (1953), Über die Möglichkeit der zerkleinerung suspendierter stoffe durch ultrashall, *Acustica* 3 124–128.
- [24] Fleischhauer, W.J. Kröger, C. (1969), *Forschungsberichte des Landes, Nordrhein Westfalen* No. 2081,
- [25] Graff, K.F. In: (1979) *Ultrasonic Comminution, Ultrasonics International '79 Proc.*, May, Graz, Austria 171–175.
- [26] Kang W, Xun H, Hu J, (2008) Study of the effect of ultrasonic treatment on the surface composition and the flotation performance of high-sulfur coal, *Fuel Processing Technology* 89 1337-1344
- [27] Raman V., Abbas A., (2008) Experimental investigations on ultrasound mediated particle breakage, *Ultrasonics Sonochemistry* 15 55–64
- [28] Raman, V. Abbas, A. Zhu, W. (2011) Particle grinding by high-intensity ultrasound: kinetic modeling and identification of breakage mechanisms, *AICHE J.* 57
- [29] Gaete-Garreto'n L.F., Vargas-Herma'ndez Y.P., Velasquez-Lambert C., (2000) Application of ultrasound in comminution, *Ultrasonics* 38 345–352

*Demir, U., Journal of Scientific Reports-B, Sayı 2, 39-54, Aralık 2020.*  
*Demir, U., Journal of Scientific Reports-B, Number 2, 39-54, December 2020.*

---

- [30] Ambedkar B., Nagarajan R., Jayanti S., (2011) Ultrasonic coal-wash for de-sulfurization, Ultrason. Sonochem. 18 718–726. 2025–2035.



*ARAŞTIRMA MAKALESİ (Research Article)*

**SU YOLLU YAPIYA DİK VE PARALEL KESİLMİŞ TRAVERTENLERDE KAPİLER SU EMME VE BASINÇ DAYANIMI ÖZELLİKLERİNİN ANİZOTROPİK DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ**

İbrahim ÇOBANOĞLU<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fak. Jeoloji Müh. Bölümü, Denizli, [icobanoglu@pau.edu.tr](mailto:icobanoglu@pau.edu.tr), ORCID: 0000-0002-2747-6397

*Geliş Tarihi: 27.07.2020*

*Kabul Tarihi: 05.12.2020*

**ÖZ**

Travertenler oluşum ortamlarına bağlı olarak desenli yapılar sunarlar. Bu yapılara genel olarak “su yollu yapı” adı verilir. Bu dokusal özelliğin, taşın üretimi sırasında da korunması ve ortaya çıkarılması istenebilir. Fabrika üretim aşamasında su yollu yapının görüldüğü taş kesim şekli vein-cut, görünmediği kesim şekli ise cross-cut adını almaktadır. Travertenlere has bu özellik, taşın kesim şekline bağlı olarak farklı görünümler sunmasını sağlamaktadır. Bu anlamda yapısal uygulamalarda mimari kullanım tercihi önem taşımaktadır. Gerçekte kesim şekillerindeki bu farklılık taşın bazı teknik özelliklerine de etki etmektedir. Bu çalışmada, travertenlerde taşın kesim şekline bağlı olarak ortaya çıkan ve anizotropiye neden olan dokusal özelliğin taşa ait kapiler su emme ve tek eksenli sıkışma dayanımı parametreleri üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Bu amaçla, dünyanın en önemli traverten havzalarından biri olan Kaklık (Denizli) bölgesindeki 7 farklı ocaktan elde edilmiş örnekler kullanılmıştır. Sonuçlar, su yollu yapıya paralel pozisyonda hem kapiler su emmelerin ve hem de tek eksenli sıkışma dayanımlarının su yollu yapıya dik pozisyona göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu durum, traverten seçiminde kesim şekline bağlı teknik özelliklerin de etkili olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen deneysel sonuçlar, travertenlerin anizotropik özellikler sergileyen doğaltaşlar olduğunu ortaya koymuştur. Travertenin inşaat sektöründeki uygulamalarında kayaca ait bu özelliklerin bilinmesi ve değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

**Anahtar kelimeler:** *Kapiler su emme, Traverten, Vein cut, Cross cut, Denizli*

**ANISOTROPIC CHANGES OF CAPILLARY WATER ABSORPTION AND COMPRESSIVE STRENGTH PARAMETERS IN “VEIN CUT” AND “CROSS CUT” SHAPED TRAVERTINES**

**ABSTRACT**

Travertines offer patterned structures depending on their sedimentological environment. These structures are generally called "waterway structures". It may be desirable to preserve and reveal this textural feature during the production of the stone. The stone-cut shape in which the waterway structure appears in the factory production stage is called “vein-cut”, and the cut shape that is not visible is referred to as “cross-cut”. This feature, which is unique to travertines, allows the stone to

offer different appearances depending on the cut shape. In this sense, the preference of architectural use in structural applications is important. In fact, this difference in cut shapes also affects various technical properties of the stone. In this study, the effect of textural feature, which arises depending on the cut shape of the stone in travertines and causes anisotropy, on the capillary water absorption and uniaxial compressive strength parameters of the stone is discussed. For this purpose, samples obtained from 7 different quarries in Kaklık (Denizli) region, one of the most important travertine basins in the world, were used. The results showed that both the capillary water absorption and uniaxial compressive strengths in the position parallel to the waterway structure were higher than the position perpendicular to the waterway structure. This situation revealed that the technical features related to the cut shape were also effective in the selection of travertine. The experimental results obtained revealed that travertines are natural stones exhibiting anisotropic properties. In the applications of travertine in the construction industry, it is important to recognize and evaluate these properties of the rock.

**Keywords:** *Capillary absorption, Travertine, Vein cut, Cross cut, Denizli*

## 1. GİRİŞ

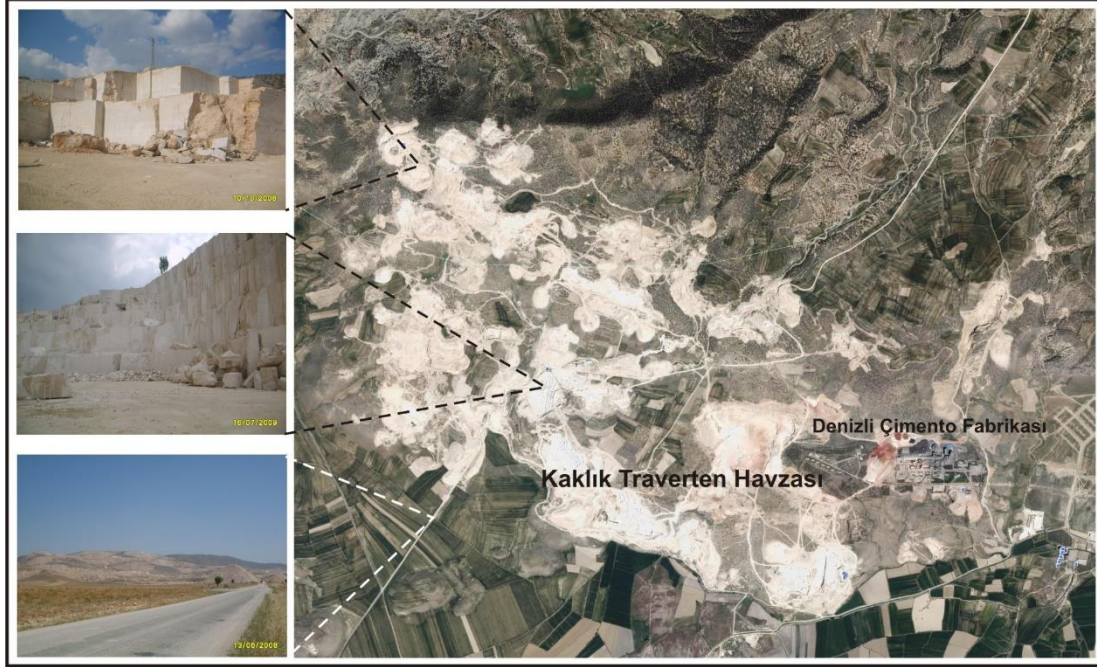
Traverten, kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ihtiva eden kaynak suları ile bilhassa sıcak su kaynaklarının, hava ile temasında, karbondioksitin ( $\text{CO}_2$ ) uçmasından sonra, tabakalar halinde birikmesi ile meydana gelmiş bir karbonat kayasıdır. Chafetz ve Folk [1], traverteni, kaynak sularından organik veya inorganik işlevlerle çökeltilmiş tatlı su karbonatları olarak tanımlamışlardır. Traverten sözcüğü İtalya'daki Tivoli kasabasının eski Roma adı olan "Tivertino"dan gelmektedir [2]. Bu terim, latince "Tiburtino" olarak bilinmektedir.

Denizli graben havzası, doğal taş ve özellikle de traverten açısından Türkiye'nin en önemli bölgesidir (Şekil 1). 1980'li yılların başında sadece birkaç ocak işletmesine sahip olan Denizli, günümüzde 50'den fazla ocak ve çok sayıda fabrika ile traverten ticaretinde dünyanın önde gelen ülkeleri arasında yer almaktadır. Bölgenin yıllık blok traverten üretim miktarı  $400.000 \text{ m}^3$  civarındadır. Bölgede yer alan antik traverten ocakları, geçmişte de bu taşın sıklıkla ve bütün yapılar (Hierapolis, Leodikeia, Tripolis vb) kullanıldığını göstermektedir.

Su yollu yapı, travertenler için tipik ve yaygın olan bir sedimantolojik doku şeklidir. Bu yapı aynı zamanda taşa doğal gözenekli bir özellik verir. Traverten üreten fabrikalarda yapılan blok kesimlerinde taşa su yollu yapı belirgin hale getirilebilmektedir. Taşa su yollu yapının görüldüğü kesim şekli "vein-cut" olarak isimlendirilir. Diğer kesim şekli olan cross-cut kesimde ise su yollu yapı belirgin değildir ve gözenekler taş yüzeyi üzerinde gelişigüzel dağılmış şekildedir. Uygulama açısından taşın kullanım yoğunluğu tamamen mimari tasarımla ilgilidir. Çoğu kez vein-cut kesilmiş travertenlerin duvar ve cephe uygulamalarında (Şekil 2a), cross-cut kesilmiş travertenlerin ise taban döşemesi olarak kullanıldığı görülmektedir (Şekil 2b).

Bir yapı uygulaması için travertenin su yollu yapıya dik (vein cut) veya paralel (cross cut) kesilmiş olmasının farklı nedenleri olabilir. Ancak mühendislik açısından her iki kesim yöntemi ile elde edilmiş taşa ait teknik parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışma, bu iki kesim yöntemi arasında etkili parametreler olan kapiler su emme ve eksenel sıkışma dayanımı değerlerinin değişimlerinin ortaya konulması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

*Çobanoğlu, İ., Journal of Scientific Reports-B, Sayı 2, 55-67, Aralık 2020.*  
*Çobanoğlu, İ., Journal of Scientific Reports-B, Number 2, 55-67, December 2020.*



**Şekil 1.** Kaklık (Denizli) traverten havzası ve yakın çevresinin genel görünümü [3'den değiştirilerek].



a- Vein-cut kesilmiş traverten uygulaması

b- Cross-cut kesilmiş traverten uygulaması.

**Şekil 2.** Kesim şekillerine bağlı olarak farklı traverten uygulama alanları (a- su yollu yapıya dik, b- su yollu yapıya paralel kesim).

Literatürde kapiler su emme çalışmalarının büyük çoğunluğunun betonlar ve sıva malzemeleri üzerinde yapılmış olduğu görülmektedir [4 - 9]. Bu çalışmalar ağırlıklı olarak farklı karışımlarla elde edilmiş betonun su emme ve kapiler su emme parametrelerinin değişimlerini ele almışlardır. Doğaltaşlar üzerinde kapiler su emmenin incelendiği çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır [10 - 12]; [3].

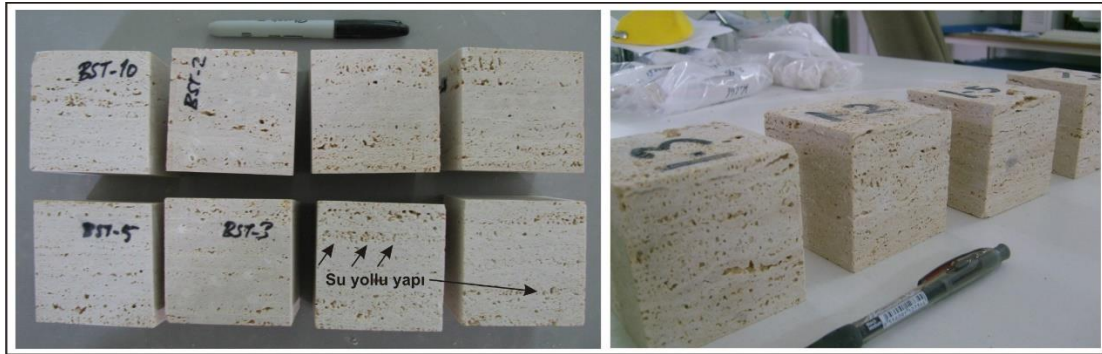


Bu çalışmaların da özellikle farklı litolojilerde doğaltaşlar için yapıldıkları görülmektedir. Bu anlamda her taş grubu için tanımlanacak parametrelerin kendi içlerinde değerlendirilmesi daha doğru olacaktır.

## 2. MATERYAL VE METOT

Deneyel olarak yürütülmüş olan bu çalışmada, Denizli - Kaklık havzasında işletilmekte olan 7 farklı ocağa ait traverten örnekleri kullanılmıştır. Bu amaçla hazırlanmış olan 7\*7\*7 cm boyutlarındaki küp şekilli örnekler su yollu yapıya dik ve paralel olacak şekilde ağırlıkça su emme, kapiler su emme ve aksel sıkışma deneylerine tabi tutulmuşlardır (Şekil 3a, Şekil 3 b ve Şekil 3c). Su yollu yapının daha kolay görülmesi ve ayrıca kesimlerin bütün olarak fabrika ortamlarında yapılmış olmasından ötürü çalışmada küp şekilli örneklerin kullanılması tercih edilmiştir.

Ağırlıkça su emme, kapiler su emme ve tek eksenli sıkışma dayanımı testleri için her ocaktan elde edilmiş örnekler kullanılmıştır. Ağırlıkça su emme deneyleri TS EN 13755 [14], kapiler su emme deneyleri TS EN 1925 [13] ve tek eksenli sıkışma dayanım (UCS) testleri TS EN 1926 [15] standartlarına göre yapılmıştır. Sıkışma dayanımı testlerinde, örnekler  $70 \pm 5$  °C'da sabit ısıya gelene kadar kurutulmuş ve ardından  $1 \pm 0.5$  MPa/s yükleme hızı uygulanarak yenilme yüküne maruz bırakılmışlardır.

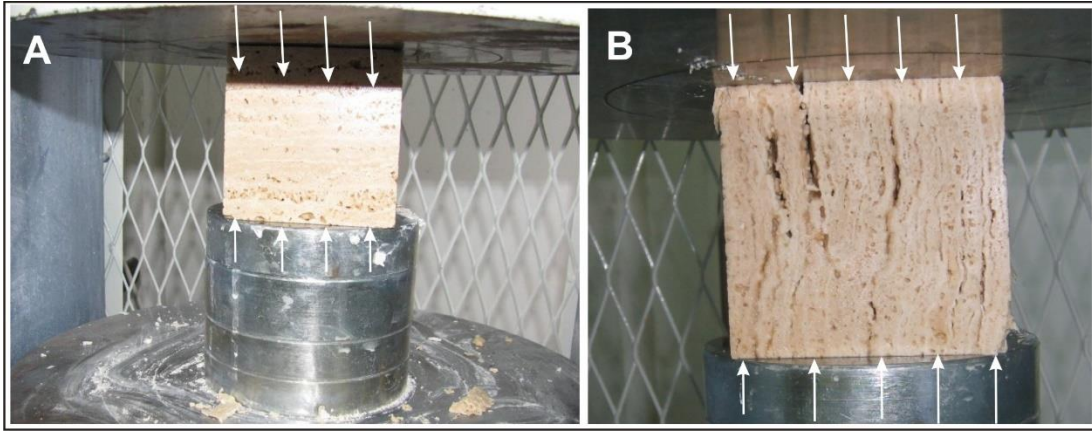


**Şekil 3a.** Hazırlanmış traverten deney numunelerinde su yollu yapıların genel görünümü.



**Şekil 3b.** Traverten deney örneklerinde su yollu yapı ve kapiler su emme deneyi sonrası bir kısım örneklerin görünümü (sağda).

Kapiler su emme deneyinde emilen suyun gram cinsinden kütlesi, numunenin  $m^2$  cinsinden taban alanına bölünerek, saniye cinsinden sürenin kare köküne karşı çizilmiş bir grafik olarak gösterilir. Genellikle grafikler Şekil 4'edekine benzerdir. Tipik bir deney grafiğinin genel olarak iki doğruyla gösterilebildiği görülür. Grafiğin birinci bölümündeki ölçülmüş noktalar ve bu birinci bölümün regresyon doğrusu arasındaki korelasyon katsayısı sırasıyla grafiğin birinci bölümünde en az 5 ölçüm alındığında 0.90'dan veya sadece 4 ölçüm alındığında 0.95'ten büyükse, kılcal etkiye bağlı su emme katsayısı  $C_1$  veya  $C_2$  ( $g/m^2 \cdot s^{0.5}$ ) sırasıyla regresyon doğrusunun eğiminden bulunur [13]. Su emme katsayısı bu doğru üzerindeki herhangi bir noktadaki yatay ve düşey eksen değerlerinin oranı olarak aşağıdaki formülle hesaplanır;



**Şekil 3c.** Travertenlerdeki su yollu yapıya dik (A) ve paralel yükleme koşullarında (B) örneklerin görünümü.

$$C_{1,2} = \frac{m_i - m_d}{A\sqrt{t_i}} \quad (g/m^2 \cdot s^{0.5}) \quad (1)$$

Bu bağtıda;

$m_d$  : Kuru deney numunesinin kütlesi, g

$m_i$  : Deney numunesinin deneydeki su emmiş kütlesi, g

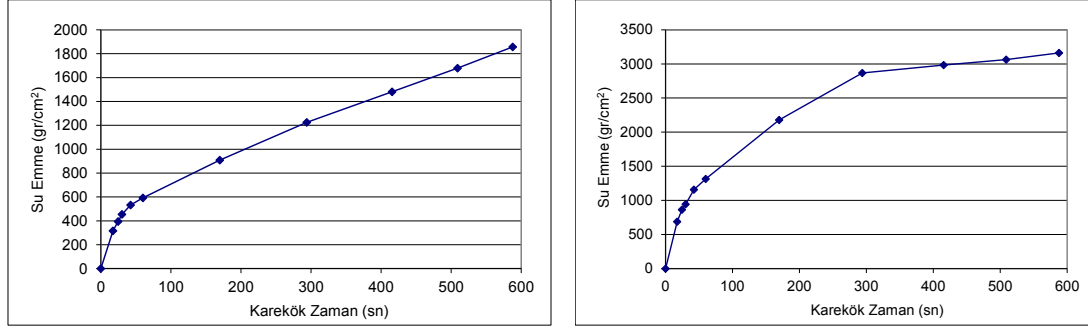
$A$  : Suya batırılmış yüzeyin alanı,  $m^2$

$t_i$  : Deney başlangıcından ardışık  $m_i$  kütlelerinin ölçüldüğü süreler, s

$C_1$  : Kayacın anizotropi düzlemlerine dik kılcal etkiye bağlı su emme katsayısı,  $g/m^2 \cdot s^{0.5}$

$C_2$  : Kayacın anizotropi düzlemlerine paralel kılcal etkiye bağlı su emme katsayısı,  $g/m^2 \cdot s^{0.5}$

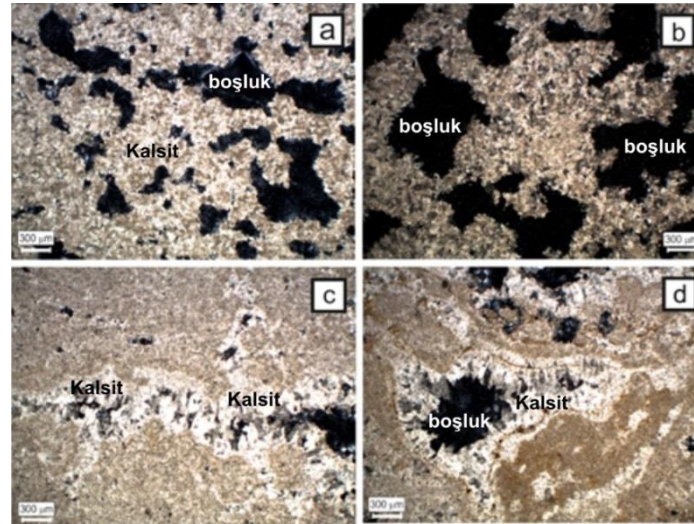




Şekil 4. Travertenler için elde edilmiş tipik kapiler su emme grafik modelleri (soldaki grafik, su yollu yapıya dik ve sağdaki grafik su yollu yapıya paralel su emme koşullarını tanımlamaktadır).

### 3. TRAVERTENLERİN PETROGRAFİK ÖZELLİKLERİ

Bu çalışma ile gerçekleştirilen ince kesit çalışmaları, travertenlerin mikrit ve mikrosparit çimentolu olduğunu ortaya koymuştur. Gözenekli yapı örneklerin genelinde baskın olup çoğu bağlantısız boşluklar şeklinde yer almaktadır. Boşlukların bir kısmında hiçbir mineral gelişimi gözlenmezken (Şekil 5, a ve b) bazen ikincil olarak gelişmiş ışınsal kalsit kristallerinin olduğu görülmektedir (Şekil 5 c ve d). Poroz yapı hem el örneklerinde ve hem de ince kesitlerde farklı şekillerde görülebilmektedir. Özellikle farklı boyutlardaki boşlukların sıralanması ile meydana gelen su yollu yapı kayacın porozitesinin de artmasına neden olmaktadır.\* Şekil 5, farklı poroz yapı türlerini içeren travertenlere ait ince kesit görünümünü göstermektedir. Travertenlerde gözenekli yapı türü oldukça değişken olup tek bir porozite türüne göre tanımlama yapmak oldukça zordur.



Şekil 5. Traverten örneklerinden hazırlanmış ince kesitlerde farklı gözenek yapı şekillerinin görüntüleri: Düzensiz ve bağlantısız açık gözenekler (Shelter tip porozite, a ve b); Yarı boş ve ikincil kalsit mineralleri ile doldurulmuş gözenekler (c ve d).

#### 4. BULGULAR

Yapılan deneysel çalışmalarla elde edilmiş ağırlıkça su emme (ASE, %), kapiler su emme (KSE ve KSEK) ve tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) değerleri Çizelge 1’de, minimum, maksimum ve ortalama değerleri ifade edecek şekilde ise Çizelge 2’de sunulmuştur. Kapiler su emme değerleri hem toplam ağırlıkça yüzde değerler cinsinden ve hem de kapiler su emme katsayısı değerleri cinsinden tanımlanmıştır. Çizelge 2’de yer alan “Paralel / Dik Oranı” sadece ortalama deney verileri kullanılarak elde edilmiştir. Bu değerlendirmede tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri için oran 1.44, kapiler su emme % değeri için 1.05 ve kapiler su emme katsayısı için 1.15 olarak hesaplanmıştır.

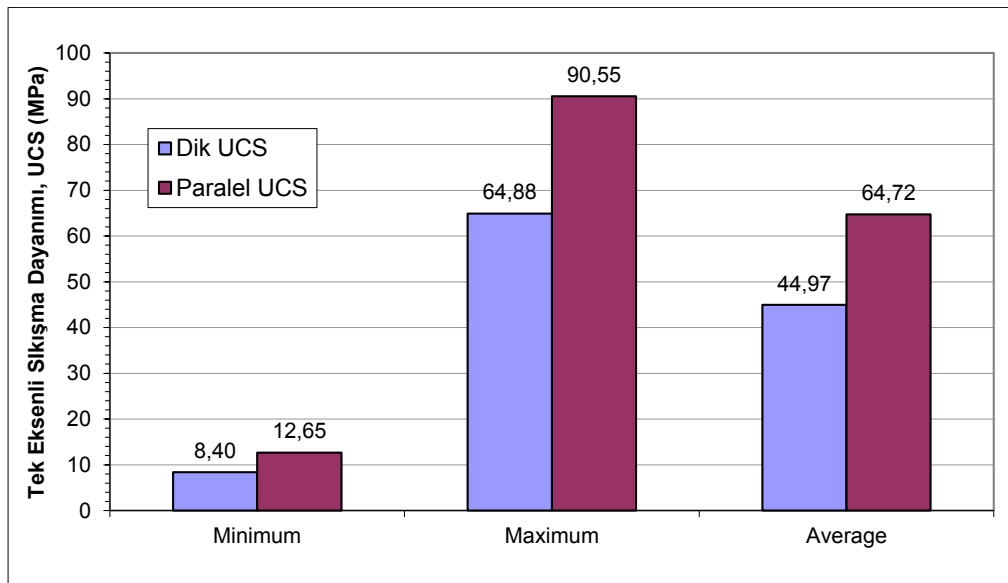
**Çizelge 1.** Deneysel çalışmalarla elde edilen ve su yollu yapıya dik ve paralel koşullar için elde edilmiş tek eksenli sıkışma dayanımı, ağırlıkça su emme ve kapiler su emme değerlerinin (% ve  $gr/m^2.s^{0.5}$ ) örnek grupları içerisindeki değişimleri.

| Örnek Grubu  | UCS (MPa)    |              | Ağırlıkça Su Emme (%) |             | Kapiler Su Emme (%) |             | Kapiler Su Emme Katsayısı |              | Açıklama   |
|--------------|--------------|--------------|-----------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------------|--------------|------------|
|              | Dik          | Paralel      | Dik                   | Paralel     | Dik                 | Paralel     | Dik                       | Paralel      |            |
| 1            | 11,52        | 18,25        | 6,68                  | 7,17        | 6,04                | 6,68        | 20,47                     | 26,61        |            |
| 2            | 14,03        | 16,40        | 7,12                  | 7,26        | 6,55                | 6,61        | 21,72                     | 26,04        | Demmer     |
| 3            | 8,40         | 12,65        | 7,40                  | 7,73        | 6,85                | 6,79        | 21,33                     | 25,29        | Mermer     |
| 4            | 11,34        | 17,90        | 6,73                  | 7,33        | 6,30                | 7,33        | 20,99                     | 27,37        |            |
| 5            | 33,71        | 69,67        | 1,29                  | 1,92        | 1,47                | 0,99        | 5,78                      | 4,05         |            |
| 6            | 48,29        | 76,34        | 1,26                  | 1,55        | 0,90                | 1,04        | 3,55                      | 4,34         | Best       |
| 7            | 47,16        | 68,96        | 1,43                  | 1,39        | 1,01                | 1,08        | 4,06                      | 4,47         | Mermer     |
| 8            | 36,49        | 73,50        | 1,87                  | 1,33        | 1,10                | 1,11        | 4,32                      | 4,57         |            |
| 9            | 38,15        | 75,10        | 1,14                  | 1,40        | 0,96                | 0,52        | 3,91                      | 2,14         |            |
| 10           | 59,79        | 86,20        | 0,97                  | 1,31        | 0,44                | 0,46        | 1,80                      | 1,90         | Pamukkale  |
| 11           | 57,76        | 88,74        | 1,00                  | 1,53        | 0,33                | 0,47        | 1,38                      | 1,94         | Mermer     |
| 12           | 64,37        | 74,45        | 1,03                  | 1,51        | 0,20                | 1,23        | 0,84                      | 4,96         |            |
| 13           | 56,21        | 64,57        | 0,61                  | 0,74        | 0,33                | 0,42        | 1,70                      | 1,14         | Alimoğlu   |
| 14           | 59,39        | 73,01        | 0,73                  | 0,75        | 0,28                | 0,39        | 1,70                      | 0,86         | Mermer     |
| 15           | 39,21        | 78,98        | 0,72                  | 0,76        | 0,36                | 0,54        | 1,47                      | 2,20         |            |
| 16           | 58,42        | 85,57        | 0,77                  | 1,75        | 1,21                | 0,45        | 4,76                      | 1,74         | Çakmak     |
| 17           | 57,28        | 90,55        | 1,01                  | 1,13        | 0,46                | 0,87        | 1,81                      | 3,37         | Mermer     |
| 18           | 64,88        | 76,00        | 1,21                  | 1,68        | 0,79                | 0,38        | 3,17                      | 1,49         |            |
| 19           | 39,86        | 54,09        | 1,53                  | 1,39        | 0,31                | 0,55        | 1,28                      | 2,24         |            |
| 20           | 48,59        | 51,30        | 2,79                  | 1,43        | 1,64                | 0,65        | 6,50                      | 2,61         | Kur        |
| 21           | 50,34        | 55,30        | 2,28                  | 1,45        | 0,95                | 0,63        | 3,82                      | 2,59         | Mermer     |
| 22           | 44,30        | 50,79        | 2,98                  | 2,45        | 1,09                | 1,84        | 4,28                      | 7,43         |            |
| 23           | 37,74        | 75,10        | 1,40                  | 1,14        | 0,96                | 0,52        | 3,91                      | 2,14         |            |
| 24           | 59,79        | 86,20        | 1,19                  | 0,97        | 0,44                | 0,46        | 1,80                      | 1,90         | Başaranlar |
| 25           | 57,76        | 88,74        | 1,53                  | 1,00        | 0,33                | 0,47        | 1,38                      | 1,94         | Mermer     |
| 26           | 64,37        | 74,48        | 1,03                  | 1,51        | 0,20                | 1,23        | 0,84                      | 4,96         |            |
| <b>Min.</b>  | <b>8,40</b>  | <b>12,65</b> | <b>0,61</b>           | <b>0,74</b> | <b>0,20</b>         | <b>0,38</b> | <b>0,84</b>               | <b>0,86</b>  |            |
| <b>Maks.</b> | <b>64,88</b> | <b>90,55</b> | <b>7,40</b>           | <b>7,73</b> | <b>6,85</b>         | <b>7,33</b> | <b>21,72</b>              | <b>27,37</b> |            |
| <b>Ort.</b>  | <b>44,97</b> | <b>64,72</b> | <b>2,22</b>           | <b>2,29</b> | <b>1,60</b>         | <b>1,68</b> | <b>5,71</b>               | <b>6,55</b>  |            |

Şekil 6, tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin su yollu yapıya dik ve paralel yükleme koşullarında elde edilmiş minimum, maksimum ve ortalama değerlerini göstermektedir. Su yollu yapıya paralel yükleme koşulları, su yollu yapıya dik yükleme koşullarından 1.44 kat daha yüksek değerler vermiştir. Bu durum, vein-cut kesilmiş örneklerde yüklemenin daha büyük değerler verdiğini ortaya koymuştur. Bu yüzden, üzerinde yük etkisi olacak koşullarda su yollu yapıya paralel (cross-cut) yerine su yollu yapıya dik (vein-cut) kesilmiş traverten plakaların taban döşemesi olarak kullanılmasının daha uygun olacağı belirlenmiştir.

**Çizelge 2.** Deneysel çalışmalarla elde edilen ve su yollu yapıya dik ve paralel koşul için tanımlanmış tek eksenli sıkışma dayanımı ve kapiler su emme değerleri.

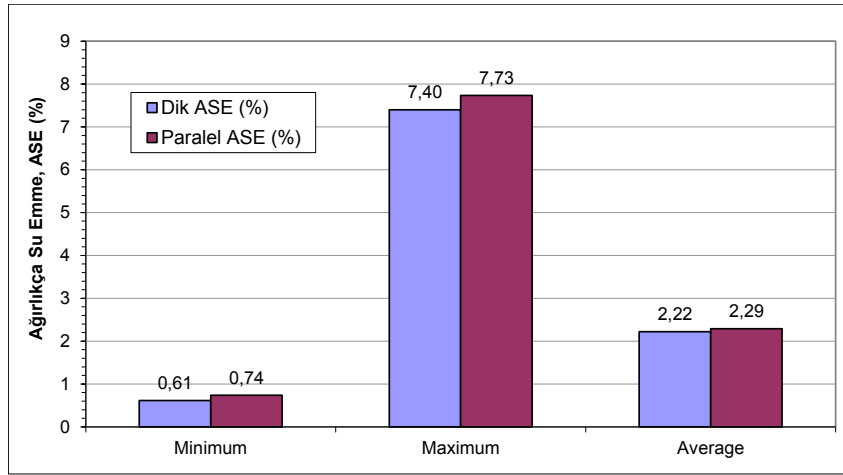
| Değer               | Dik UCS | Paralel UCS | Dik KSE | Paralel KSE | Dik KSEK | Paralel KSEK |
|---------------------|---------|-------------|---------|-------------|----------|--------------|
| Minimum             | 8.40    | 12.65       | 0.20    | 0.38        | 0.84     | 0.86         |
| Maksimum            | 64.88   | 90.55       | 6.85    | 7.33        | 21.72    | 27.37        |
| Ortalama            | 44.97   | 64.72       | 1.60    | 1.68        | 5.71     | 6.55         |
| Paralel / Dik Oranı |         | 1.44        |         | 1.05        |          | 1.15         |



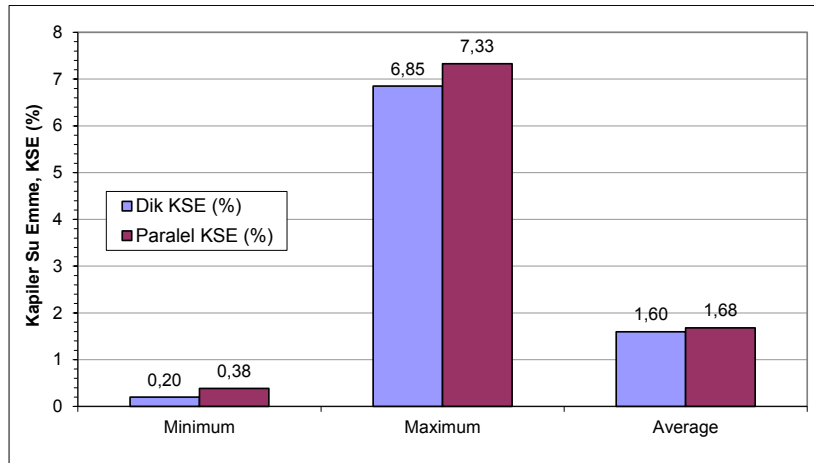
**Şekil 6.** Su yollu yapıya dik ve paralel tek eksenli yükleme durumunda tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) değerlerinin değişimi.

Şekil 7, deney örneklerinin ağırlıkça su emme (ASE, %) deneylerine ait verileri içermektedir. Bu grafik için elde edilmiş olan sayısal değerler aradaki farkın oldukça az olduğu görülmektedir. Su yollu yapıya paralel olarak su emmenin sağlanması koşulunda ağırlıkça su emme değerlerinde yaklaşık % 3'lük bir artışın olduğu belirlenmiştir.

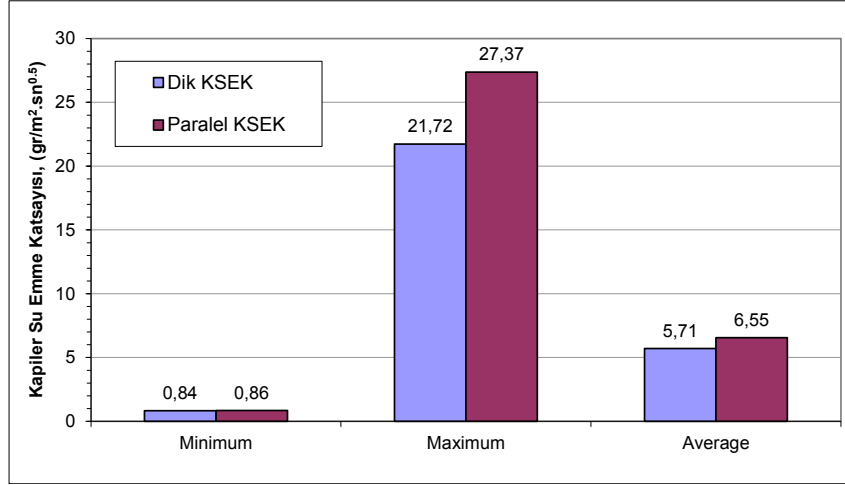
Şekil 8 ve Şekil 9 ise kapiler ağırlıkça su emme (KSE, %) ve kapiler su emme katsayısı (KSEK,  $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ) değerlerinin su yollu yapıya dik ve paralel olması durumu için elde edilmiş verileri göstermektedir. Ağırlıkça kapiler su emme (KSE, %) ortalama değerleri su yollu yapıya paralel durumda daha yüksek değerlerin elde edildiğini göstermiştir. Benzer durum, kapiler su emme katsayısı (KSEK,  $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ) değerlerinde de görülmektedir. Elde edilen değerler, su yollu yapıya paralel pozisyonda kapiler su emme değerlerinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Kapiler su emme parametrelerinin yüksek olması taşın suya hassasiyetini de artırmaktadır. Bu yüzden özellikle açık alanlarda kullanılacak doğaltaşlar için kapiler su emme değerlerinin düşük olması istenmektedir. Elde edilen deneysel çalışma verileri, atmosferik koşullar etkisinde kullanılması düşünülen traverten doğaltaşları için cross-cut kesilmiş levhaların kullanılmasının daha uygun olacağını ortaya koymuştur.



Şekil 7. Ağırlıkça su emme (%) değerlerinin su yollu yapıya dik ve paralel olması koşulu için değişimleri.



Şekil 8. Su yollu yapıya dik ve paralel kapiler su emme durumunda ağırlıkça kapiler su emme yüzde değerlerinin değişimi.



Şekil 9. Su yollu yapıya dik ve paralel kapiler su emme durumunda kapiler su emme katsayısı ( $\text{gr/m}^2.\text{sn}^{0.5}$ ) değerlerinin değişimi.

## 5. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ ve YORUMLANMASI

Kayaçların toplam su emme miktarı, görünür porozitenin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Kapiler su emmede kaya litolojisi ile birlikte kapilariteye sebep olan boşlukların da etkisi bulunmaktadır. Bu bakımdan kapiler su emme, toplam su emmenin oransal bir karşılığı olarak tanımlanabilir [3]. İnce taneli ve kapiler boşlukların fazlalığı oranında doğal taşın kapiler su emme değerleri de artmaktadır. Kapiler su emmenin fazlalığı oranında taşın atmosferik koşullardan etkilenme derecesi de artar ve bu durum taşın homojen yapısının bozulmasına neden olur. Literatürde bütün doğaltaş türleri için tanımlanmış bir kapiler su emme sınıflaması bulunmamaktadır. Bununla birlikte, DIN 52617 standardı [16] kapiler su emme katsayısı  $0.5 - 2.0 \text{ kg/m}^2.\text{h}^{0.5}$  olan malzemeleri “kısıtlı su emici” olarak tanımlamaktadır. Ayrıca Çobanoğlu (2015) [3] tarafından yapılan çalışma ile travertenler için geçerli olacak bir kapiler su emme sınıflaması geliştirilmiştir. Bu sınıflamada Anon [17] tarafından önerilmiş olan porozite sınıflaması esas alınmış ve bu porozite sınıflaması değerlerine karşılık gelen kapiler su emme katsayısı (KSEK) ve kapiler su emme değerleri (%) tanımlanmıştır (Çizelge 3).

Bu çalışma, travertenlerde hem kapiler su emme ve hem de eksenel sıkışma dayanımı değerlerinin anizotropik değişimlerini ortaya koymaktadır. Bu anlamda travertenler anizotropik özellik sergileyen doğaltaşlar olarak tanımlanabilirler. Bu özellik, travertenlerin sınıflandırılmaları sırasında tanımlanacak sınıf değerlerinin de değişimlerine neden olabilmektedir.

**Çizelge 3.** Travertenlerde kapiler su emmenin tanımlanması için önerilmiş olan sınıflandırma [3].

| <i>Sınıf</i> | <b>Anon (1979)</b>  |                  | <b>Kapiler Su Emme Sınıflaması</b>             |                |                  |
|--------------|---------------------|------------------|------------------------------------------------|----------------|------------------|
|              | <b>Porozite (%)</b> | <b>Tanımlama</b> | <b>KSEK (gr/m<sup>2</sup>*s<sup>0.5</sup>)</b> | <b>KSE (%)</b> | <b>Tanımlama</b> |
| 1            | > 30                | Çok yüksek       | > 68                                           | > 13           | Çok yüksek       |
| 2            | 30 – 15             | Yüksek           | 68 – 22                                        | 13 – 6         | Yüksek           |
| 3            | 15 – 5              | Orta             | <b>22 – 5</b>                                  | 6 – 2          | <b>Orta</b>      |
| 4            | 5 – 1               | Düşük            | < 5                                            | < 2            | <b>Düşük</b>     |
| 5            | < 1                 | Çok düşük        | ---*                                           | ---*           | ---*             |

\* TS EN 1925 (2000) standardına göre, açık gözenekliliği < % 1 olan kayalar için bu deneyin yapılması gerekli değildir.

Hem vein cut ve hem de cross cut örnekler için ortalama değerler ele alındığında kapiler su emme katsayısına (KSEK, gr/m<sup>2</sup>.sn<sup>0.5</sup>) göre travertenler “Orta” sınıfa ait olarak tanımlanmaktadır. Aynı değerlendirme, kapiler su emme (KSE, %) değerlerine göre yapıldığında tanımlanan sınıfın “Düşük” olduğu görülmektedir (Çizelge 3).

Su yollu yapıya dik ve paralel yükleme koşulları için elde edilen ortalama değerler yorumlandığında, su yollu yapıya paralel yükleme koşulu için daha yüksek sıkışma dayanımının (ortalama değer 64.72 MPa) elde edildiği görülmektedir. Su yollu yapıya paralel yükleme koşulu için aynı değer 44.97 MPa olarak elde edilmiştir. Su yollu yapıya paralel yükleme koşulunda kaya tanımı “Orta Dayanımlı” olarak elde edilirken, su yollu yapıya dik yüklenmesi koşulunda kaya tanımı “Düşük Dayanımlı” olarak elde edilmektedir (Çizelge 4).

**Çizelge 4.** Tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) değerlerine göre kaya dayanım sınıflaması [18].

| <b>Kaya Sınıfı</b>     | <b>Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)</b> |
|------------------------|------------------------------------------|
| Çok yüksek dayanımlı   | > 200                                    |
| Yüksek dayanımlı       | 200 – 100                                |
| <b>Orta dayanımlı</b>  | <b>100 – 50</b>                          |
| <b>Düşük dayanımlı</b> | <b>50 – 25</b>                           |
| Çok düşük dayanımlı    | < 25                                     |

Travertenlerde oluşum koşullarına bağlı olarak su yollu yapının olması, kayacın anizotropik özellikler sergilemesine neden olmaktadır. Su yollu yapıya paralel koşul için su emme parametrelerinin daha yüksek çıkması bu yüzeylerin suyun kolay iletilmesini sağlayan kanal vazifesi görmesinden kaynaklanmaktadır. Su yollu yapıya paralel duruma ait su emme deneylerinde kapiler yükselme bu kanallar vasıtasıyla kolay bir şekilde gerçekleşebilmektedir.

Tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde eksenel yüklemenin su yollu yapıya paralel olması koşulunda, yüzeylerin birer süreksizlik düzlemi gibi çalıştığı görülmektedir. Yapılan ince kesit çalışmalarında, su yollu yapı yüzeyleri boyunca gelişmiş ikincil kalsit kristallerinin varlığı ve ayrıca yüzeylerin pürüzlülüklerinin artması ile yükleme sırasında oluşan gerilmelere direnci arttığını

göstermiştir. Su yollu yapıya ait yüzeyler yenilme sırasında içsel sürtünmelerin artmasına neden olmakta ve bu durum da tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin yükselmesini sağlamaktadır. Deneyler esnasında yenilme yüzeylerinin su yollu yapıyı oluşturan düzlemler boyunca meydana gelmesi de bu öngörüü doğrulamaktadır.

## **6. SONUÇ ve ÖNERİLER**

Tüm doğaltaşlarda olduğu gibi travertenlerde de kullanım alanlarını belirleyen özellikler taşa ait teknik parametrelerdir. Bu parametrelerin başında tek eksenli sıkışma dayanımı ve su emme değerleri gelmektedir. Vein-cut (su yollu yapı) ve cross-cut (düz gözenekli yapı) kesilmiş travertenler hem iç ve hem de dış mekanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, su yollu yapıya paralel yükleme durumunda elde edilmiş tek eksenli sıkışma dayanımlarının su yollu yapıya dik yükleme koşuluna göre daha yüksek değerler verdiği belirlenmiştir. Bu anlamda vein-cut kesilmiş travertenlerde dayanım cross-cut kesilmiş örneklerle göre 1.45 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Vein-cut örneklerin yüksek sıkışma dayanımlarına karşılık, kapiler su emme değerlerinin de yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden özellikle vein-cut kesilmiş traverten plakaların, üzerinde yük işlevi de olabilecek kapalı mekanlarda kullanılması daha uygun olarak değerlendirilmiştir. Bahçe sulaması, yüzme havuzu vb. işlevlerle su ile temasta olacak dış mekan döşemelerde ise cross-cut kesilmiş travertenlerin kullanılmasının teknik açıdan uygun olduğu görülmektedir.

## **TEŞEKKÜR**

Bu çalışma için gerekli örneklemlerin yapılmasını sağlayan Başaranlar Mermer, Best Mermer, Demmer Mermer, Alimoğlu Mermer, Pamukkale Mermer, Çakmak Mermer ve Kur Mermer firmalarına teşekkürü bir borç bilirim.

## **KAYNAKÇA**

- [1] Chafetz, S.H., Folk, R.L., (1984), Travertines: Depositional morphology and the bacterially constructed constituents, *Journal Of Sedimentary Research* 54(1):289-316.
- [2] Atabey E (2003) Tufa ve Traverten, JMO Yayını. 106 s Ankara.
- [3] Çobanoğlu, İ., (2015), Prediction and identification of capillary water absorption capacity of travertine dimension stone, *Arab J Geosci*, (8), pp.10135–10149.
- [4] Hall, C., (1981), Water Movement in porous building materials-IV. The initials surface absorbtivity and the absorptivity, *Building and Environment*, 16 (3), pp. 201 – 207.
- [5] Reinhardt, H.W. ve Jooss, M., (1998), Permeability, Diffusion, and Capillary Absorption of Concrete at Elevated Temperature in the Service Range, *Otto-Graf-Journal* Vol. 9, pp. 34 – 47.



- [6] Türk, K., Çalışkan, S., Yazıcıoğlu, S., (2007), Capillary water absorption of self-compacting concrete under different curing conditions, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol 14, pp. 365 – 372.
- [7] Arslan, M., (2001), The effects of permeable formworks with sucker liner on the physical properties of concrete surface, *Construction and Building Materials*, 15 (4), pp. 149 – 156.
- [8] Camoes, A., Aguiar, B., Jalali, S., (2003), Durability of Low Cost Performance Fly Ash Concrete, *International Ash Utilization Symposium*, paper 43, Kentucky.
- [9] Lanzon, M., Garcia-Ruiz, P.A., (2009), Evaluation of capillary water absorption in rendering mortars made with powdered waterproofing additives, *Construction and Building Materials*, 23, pp. 3287 – 3291.
- [10] Kırğız, M.S., Subaşı, S., Durmuş, G., (2003), Kırşehir-Kaman-Demirli Yöresi Mermerlerinin Bazı Teknolojik Özellikleri, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (4), s. 825 – 838, Ankara.
- [11] Vázquez P., Alonso, F.J., Esbert, R.M., Ordaz, J., (2010), Ornamental granites: Relationships between p-waves velocity, water capillary absorption and the crack network, *Construction and Building Materials*, 24, 2536–2541.
- [12] Dinçer, İ., Özvan, A., Akın, M., Tapan, M., Oyan, V., (2012), İgnimbiritlerin Kapiler Su Emme Potansiyellerinin Değerlendirilmesi: Ahlat Taşı Örneği, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi/ Journal of The Institute of Natural & Applied Sciences* 17 (2):64-71.
- [13] TS EN 1925 (2000), Natural Stones- test methods – Determination of water absorption constant depending on capillary action. TSE Publication, Ankara.
- [14] TS EN 13755 (2009), Natural Stones- test methods – Determination of water absorption at atmospheric pressure, TSE Publication, pp 1- 7, Ankara,
- [15] TS EN 1926 (2007), Doğal taşlar-Deney metotları-Atmosfer basıncında su emme tayini, TSE Yayını, 12 p., Ankara.
- [16] DIN 52617 (1987), Determination of The Water Absorption Coefficient of Construction Materials, German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung).
- [17] Anon, (1979), Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part I – rock and soil materials. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 19, p.364–371.
- [18] Deere and Miller (1966). Engineering classification and index properties for intact rock” *Tech. Report No AFWL - TR-65-116*, Laboratory, New Mexico.