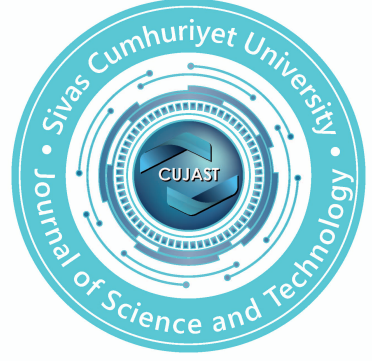


4(1):2025



Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology

Published By
Sivas Cumhuriyet University
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/cujast>

E-ISSN: 2980-0110



Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi
Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology

Year (Yıl): 2025, Volume (Cilt):4, Number (Sayı):1

Dergi İmtiyaz Sahibi / Owner

Prof. Dr. Tanju TEKER

Editör / Editor in Chief

Doç. Dr. Doğan Engin ALNAK

Yardımcı Editörler / Associate Editors

Prof. Dr. İbrahim CAN

Doç. Dr. Serdar MERCAN

Teknik Editor / Technical Editor

Doç. Dr. Ferhat KOCA



Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi
Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology

Advisory Board (Danışma Kurulu)

Prof. Dr. Bilge Demir	Karabük Üniversitesi
Prof. Dr. Coşkun ÖZALP	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi
Prof. Dr. Murat HOŞÖZ	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Serdar OSMANYILMAZ	Namık Kemal Üniversitesi
Prof. Dr. Yasin VAROL	Fırat Üniversitesi



Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi
Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology

Subject Editors (Alan Editörleri)

Prof. Dr. Tanju TEKER	Doç. Dr. Sinan AYDIN
Prof. Dr. Nail ALTUNAY	Doç. Dr. Özlem POLAT
Prof. Dr. Fatih UNGAN	Doç. Dr. Tahsin YÜKSEL
Prof. Dr. Murat KÖKSAL	Doç. Dr. Sibel ARSLAN
Prof. Dr. Turhan KURŞUN	Dr.Öğr. Üyesi Nazile YILANKIRKAN
Doç. Dr. İlker Temizer	Dr.Öğr. Üyesi Emre ÜNSAL
Doç. Dr. Abdullah KAPICIOĞLU	Dr.Öğr. Üyesi Yakup EMÜL
Doç. Dr. Rukiye KARAKIŞ	Dr. Öğr. Üyesi Recai ÖZCAN

Journal secretariat (Dergi Sekreteryası)

Dr. Öğr. Üyesi Yeliz ALNAK	Arş.Gör. Gökhan AZİZOĞLU
Arş.Gör. Onur ÖRNEK	Arş.Gör. Kürşat TUNCER
Arş.Gör. Fatih CİVELEK	

Language Editors (Dil Editörü)

Doç. Dr. Özlem POLAT	Arş.Gör. Onur ÖRNEK
----------------------	---------------------



Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi (CUJAST) hakemli bir dergidir.

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi yılda iki kez yayınlanmaktadır (Haziran ve Aralık).

Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology (CUJAST) is a peer-reviewed journal.).

Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology is published two times in a year (June and December).

Dergi İçin Yazışma Adresi / Correspondence Address

Doç. Dr. Doğan Engin ALNAK (Editor in Chief)

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

e-mail: dealnak@cumhuriyet.edu.tr

cujast@cumhuriyet.edu.tr

Web link: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/cujast>

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology

Year (Yıl): 2025, Volume (Cilt):4, Number (Sayı):1

CONTENTS (İçindekiler)	Sayfalar
Mervenur Aydın, Ferhat Koca <i>Numerical Investigation of the Effect of Inter-Cooling Channels on the Cooling of Lithium-Ion Battery Modules</i> Lityum-İyon Batarya Modüllerinin Soğutulmasında Ara Soğutma Kanallarının Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi	1-11
Berk Özler, Serdar Yıldırım <i>Investigation of SiO₂ Nanoparticle Reinforced Epoxy Composites Produced by Additive Manufacturing: Effect of Silanization on Conversion Degree and Mechanical Properties</i>	12-20
Esra Başpınar, Vekil Sarı <i>Design and Economic Assessment of a Building-Integrated Photovoltaic System at the Faculty of Engineering, Sivas Cumhuriyet University</i> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Çatıya Entegre Güneş Enerjisi Santrali Tasarımı ve Ekonomik Değerlendirmesi	21-31
Özlem Kaya, Şaban Özütürker <i>Evaluation of Some Process Parameters with Combustible Recovery and Ash Content in Flotation Beneficiation of Lignite Coal</i> Linyit Kömürünün Flotasyon ile Zenginleştirilmesinde Bazı Proses Parametrelerinin Yanabilir Verim ve Kül İçeriği ile Değerlendirilmesi	33-37
Hamdi Dağıstanlı <i>Strain Effect and Artificial Intelligence Applications on Electronic Band Structure of MoS₂</i>	38-50
Özlem Kaya, Ahmet Özkan <i>Investigation of the Effects of Suspension pH, Stirring Speed, Stirring Time, and Solid Ratio on Feldspar Flocculation Using Non-Ionic Flocculants</i> Feldspat Flokülasyonunda Süspansiyon pH'sı, Karıştırma Hızı, Karıştırma Süresi ve Katı Oranının Etkilerinin Non-İyonik Flokülantlar Kullanılarak İncelenmesi	51-58
Çiğdem Bozdemir, Serkan Uranbey <i>Correlation Analysis between Yield and Yield Components in some Black Cumin (Nigella Sativa L.) Genotypes</i> Bazı Çörek Otu (Nigella Sativa L.) Genotiplerinin Verim ve Verim Unsurları Arasındaki Korelasyon Analizi	59-65



Numerical Investigation of the Effect of Inter-Cooling Channels on the Cooling of Lithium-Ion Battery Modules

Mervener Aydın^{1,a,*}, Ferhat Koca^{2,b}

¹-Enerji Bilimi ve Teknolojisi Mühendisliği / Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Türkiye

² Mekatronik Mühendisliği / Teknoloji Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 09/05/2025

Accepted: 16/06/2025

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

Abstract- In this study, the cooling of a battery model consisting of 21 18650-type lithium-ion batteries is numerically investigated with intercooling channels placed at 45° angles and at different stages. The rectangular battery box is designed with a width of 92 mm and a length of 136 mm. In order to increase the cooling capacity of the battery box, intercooling channels at different stages were added to the battery box and analyses were performed with the help of computational fluid dynamics method. The effect of Re= 5000, 10000, 20000 and 40000 on heat transfer was investigated. A constant heat generation of 48750 W/m³ was applied to the batteries throughout the study. Standard model and intercooling channels with 45° angle were evaluated in 3 different stages in terms of heat transfer and energy efficiency. As a result of the analyses, when all models were compared among each other, it was observed that the 45° intercooling stage 2 model gave the best thermal performance and the stage 3 model gave the most balanced values in terms of energy efficiency. In addition to these, it was concluded that the in-battery heat exhibits a homogeneous distribution in the 45° intercooling stage 2 model. In this respect, intercooling is considered to have significant potential for future applications in smart vehicle technologies.

Keywords: Lithium-ion battery cooling, Intercooling, Computational fluid dynamics, Finite element method

Lityum-iyon Batarya Modüllerinin Soğutulmasında Ara Soğutma Kanallarının Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Araştırma Makalesi

Süreç

Geliş: 09/05/2025

Kabul: 16/06/2025

ÖZ

Özet – Bu çalışmada, 18650 tipi 21 adet lityum-iyon pilden oluşan batarya modelinin, 45° açıda ve farklı kademelerde yerleştirilen ara soğutma kanallarıyla soğutulması sayısal olarak incelenmiştir. Dikdörtgen yapıdaki batarya kutusu 92 mm genişliğinde ve 136 mm uzunluğunda tasarlanmıştır. Batarya kutusuna soğutma kapasitesini arttırmak için farklı kademelerde ara soğutma kanalları karşılıklı olarak eklenmiş ve analizler hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi yardımıyla yapılmıştır. Re= 5000, 10000, 20000 ve 40000 değerlerinde ısı transferine etkisi araştırılmıştır. Çalışma boyunca pillere sabit 48750 W/m³ ısı üretimi uygulanmıştır. Standart model ile 45° açıda sahip ara soğutma kanalları 3 farklı kademede, ısı transferi ve enerji verimliliği bakımından değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda tüm modeller birbirleri arasında kıyaslandığında, 45° ara soğutma kademe 1 modelinin termal performansı en iyi, kademe 3 modelinin ise enerji verimliliği açısından en dengeli değerleri verdiği gözlemlenmiştir. Bunların yanı sıra batarya içi ısının 45° ara soğutma kademe 2 modelinde homojen dağılım sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu yönüyle akıllı araç teknolojilerinde gelecekteki uygulamalar için ara soğutmanın önemli potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Lityum-iyon batarya soğutma, Ara soğutma, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Sonlu elemanlar yöntemi.

Giriş

Günümüzde fosil yakıtların kullanıldığı geleneksel araçlar yerini daha çevreci ve enerji kaynağının sürdürülebilir olduğu elektrikli araçlara bırakmaktadır. Çevre dostu bir alternatif olarak elektrikli araçlar sessiz çalışma ve düşük karbon emisyonu sayesinde şehir içi ve şehirler arası yolculuklarda kullanım kolaylığı sağlamaktadır (Eğin, 2019; Menak ve ark., 2021). Elektrikli araçların avantajlarının yanı sıra bazı teknik zorlukları da mevcuttur. Bunların başında şarj süresi, sınırlı sürüş menzili ve batarya termal yönetimi gelmektedir (Hamurcu, Çakır ve Eren, 2021; Aktaş ve ark., 2020). Bu durumda lityum-iyon bataryalar; yüksek enerji, güç yoğunluğu, hafiflik, düşük maliyet ve hızlı şarj olabilme özellikleriyle umut vadetmektedir (Yong ve ark., 2015; Scrosati ve Garche, 2010). Lityum-iyon bataryaların çalışma sıcaklığı 20°C ile 40°C arasında değişmektedir (Kim, Han ve Hong, 2022; Pesaran, 2002; Qian, Li ve Rao, 2016). Çevresel faktörler ve kullanım şartları bu bataryaların fazla ısınmasına ve elektrikli araçlarda performans düşüşüne neden olmaktadır. Bu gibi durumlarda bataryadan maksimum verim alabilmek için batarya paketi soğutma sistemleri önemli rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar batarya termal yönetimini genel olarak dört başlığa ayırmaktadır. Bunlar; sıvı soğutmalı, hava soğutmalı, faz değiştiren malzeme (FDM) ve hibrit sistemlerdir (Bulut, 2022). Elmi ve Zhao (2024), silindirik lityum-iyon pil paketlerinde termal yönetim stratejilerini dört ana termal yönetim tekniği; hava soğutma, sıvı soğutma, faz değişim malzemeleri (FDM) ve hibrit yöntemlere göre detaylı şekilde incelemiştir. Hava soğutma sistemlerinde, pillerin ısı yayma yapıları ile donatılarak ya da soğutma kanatları ile soğutularak soğutma verimliliğinin artırılabilirliğini belirtmişlerdir. Sıvı soğutma sistemlerinde, bir sıvının batarya paketini tamamen dolaşarak şarj ve deşarj esnasında üretilen ısıyı sıvının emmesiyle soğutmanın gerçekleştiğini belirtmişlerdir. FDM'lerin yüksek gizil ısı kapasitelerine dayanıklılığı sayesinde bataryaların sıcaklığı erime noktasının üzerine çıktığında ısının izotermal olarak emilebildiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca bataryanın sıcaklığı düştüğünde ise FDM'nin izotermal olarak ısıyı geri bıraktığını belirtmişlerdir. Hibrit soğutma sistemlerinde ise lityum-iyon piller için birden fazla soğutma tekniğinin birleştirilerek daha iyi soğutma performansı gösterdiğini vurgulamışlardır. Lityum-iyon piller için soğutma teknolojilerinin hala yeterince gelişmediğini çalışmaların hem maliyet hem de performans açısından uygun olması gerektiğini ve bunun için FDM'lerin daha fazla teşvik edilebileceğini belirtmişlerdir. Celen ve Kaba (2021), elektrikli araçlarda kullanılan 10x10 dizilime sahip lityum-iyon batarya grubunu hava ve Novec 7200 sıvısıyla soğutarak incelemiştir. Akışkanın giriş sıcaklığını 15°C ve 35°C aralığında, bataryadaki ısı üretimini 2-6 W aralığında ve Reynolds sayısını 22559 ile 67678 aralığında tutarak bu değerlerin ortalama batarya sıcaklığına ve

basınç kaybına etkilerini araştırmışlardır. Hava sıcaklığının 15°C üzerine çıktığı durumlarda sıvı ile soğutma sisteminin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Sabit Reynolds sayılarındaki analizlerde hava ve sıvı soğutma sistemleri arasındaki basınç kayıplarında önemli farklara rastlamamışlardır. Hava sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda sıvı soğutma sistemlerinin daha kullanışlı olduğunu belirtmişlerdir. Sıvı soğutma sistemlerinin batarya termal yönetiminde daha verimli olduğunu belirtmişlerdir. Hasan ve ark. (2023), lityum-iyon pillerin performansını iyileştirmek ve farklı soğutucu akış hızlarında çalışma sıcaklığını düşürmek için hava soğutmalı yeni bir tasarım geliştirmişler ve k-ε türbülans modeli kullanarak sonlu hacim tabanlı bir hesaplama aracı ile yeni tasarımı sayısal olarak incelemiştir. 52 adet lityum-iyon pil hücresi bulunan batarya paketini piller arası mesafe $S=2$ mm olacak şekilde üçlü ve ikili olarak yerleştirmişlerdir. Soğutucu akışkan olarak seçtikleri havanın aynı giriş ve çıkış çapında ($d=10$ mm), $Re=15000$, 17500 , 20000 , 22500 , 27500 ve 30000 çalışma aralığında incelemiştir. Reynolds sayısı arttırdıkça batarya hücrelerindeki ortalama hava sıcaklığının ve sıcaklık farkının düştüğünü belirtmişlerdir. Chung ve Kim (2019), elektrikli araçlarda kullanılan sıvı soğutmalı batarya paketi için metal kanatçıklı batarya modeli geliştirmişler ve tasarımı sayısal olarak incelemiştir. Hücrelerin alt tarafına yerleştirilen soğutma plakalarını modifiye ederek hücrelerin yan kısmına yerleştirmişlerdir. Ayrıca asimetrik hücre dizini yerine yeni hücre dizini olarak simetrik hücre dizini uygulamışlardır. Isı iletiminde simetrik hücre dizininin daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Soğutma plakalarını hücrelerin yan kısmına yerleştirmenin ise batarya paketinin hacminde, ağırlığında ve basınç düşüşündeki artışı en aza indirdiğini belirtmişlerdir. Yeni tasarım ile batarya paketinin soğutma performansının ve sıcaklık dağılımının homojen şekilde olduğunu belirtmişlerdir. E ve ark. (2018), 18650 model 60 adet (6x10) lityum-iyon pilden oluşan batarya modülünde termal özellikleri iyileştirmek amacıyla, hava akış giriş ve çıkış konumlarını ayırıcı levhalar yardımıyla değiştirerek soğutma performansını, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi ve simülasyonlar kullanarak incelemiştir. Tasarlanan modelde hava girişinin üstte, hava çıkışının ise altta olduğu konumda termal performans bir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir ancak farklı taraflarda konumlandırılan yan giriş ve yan çıkışın sıcaklık dağılımını dengelediğini belirtmişlerdir. Ayrıca ayırıcı plakanın hava akışını yönlendirerek yan girişte hava ile soğutma performansını arttırdığını vurgulamışlardır.

Literatürde var olan çalışmalarda lityum-iyon bataryaların soğutulmasında hava ile soğutma sistemlerinin ortam sıcaklığı ve ısı iletimine bağlı olarak yetersiz kaldığı fark edilmiştir. Bu çalışmada 45° ara soğutma kanal geometrisi ve pil yerleşimi ile termal iletkenliğin artırılması hedeflenerek yenilikçi bir soğutma tasarımı geliştirilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Çalışmanın bu bölümünde lityum-iyon batarya kutusunun soğutulması için 45° açısına ve 1,2,3 kademelerine sahip ara soğutma kanallarına odaklanılarak modeller oluşturulmuştur ve tasarlanan yeni modeller için sınır şartları verilmiştir. Batarya kutusu standart modeli 92 mm genişlik, 136 mm uzunluk ve 65 mm yükseklik ile tüm geometrilerde kullanılmıştır. Batarya kutusunun ön kısmına 8 mm genişlik ve 60 mm uzunluğa sahip beş adet dikdörtgen giriş yerleştirilmiştir. Batarya kutusunun arka yüzeyinin tam ortasına ise çapı 50 mm olan bir adet çıkış yerleştirilmiştir. Batarya kutusu içerisine lityum-iyon 18650 tip piller merkezleri arası mesafe 22 mm ve piller arası mesafe 4 mm olmak üzere ilk sırada 4 pil sonraki sırada çapraz dizilim ile 3 pil olacak şekilde 6 sıra halinde yerleştirilmiştir. Türbülans modeli standart k- ϵ türbülans modeli seçilmiştir. Soğutma akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Havanın giriş sıcaklığı 299,15 K, giriş hızı (u) ise kanal giriş kesitine göre hesaplanan 10000 Reynolds değerinde 1,72 m/s olarak hesaplanmıştır. Çalışma

boyunca pillerin ısı üretimi 48750 W/m^3 olarak sabit alınmıştır. Batarya kutusuna ek olarak 8 mm genişliğe ve 65 mm uzunluğa sahip iki adet ara soğutma kanalı karşılıklı olarak modellenmiştir. Ara soğutma kanalları 45° ile batarya kutusunun yan kısmına kanalın batarya ile birleştiği kısmın genişliği 40 mm olacak şekilde üç farklı kademede yerleştirilmiştir ve toplam 4 farklı model oluşturulmuştur. Çalışmada; standart model, 45° ara soğutma kademe 1 model, 45° ara soğutma kademe 2 model, 45° ara soğutma kademe 3 model geometrileri için $Re = 5000, 10000, 20000$ ve 40000 değerlerinde çözümler gerçekleştirilmiştir.

Analiz için kullanılan modellerin sınır şartları Tablo 1'de verilmiştir.

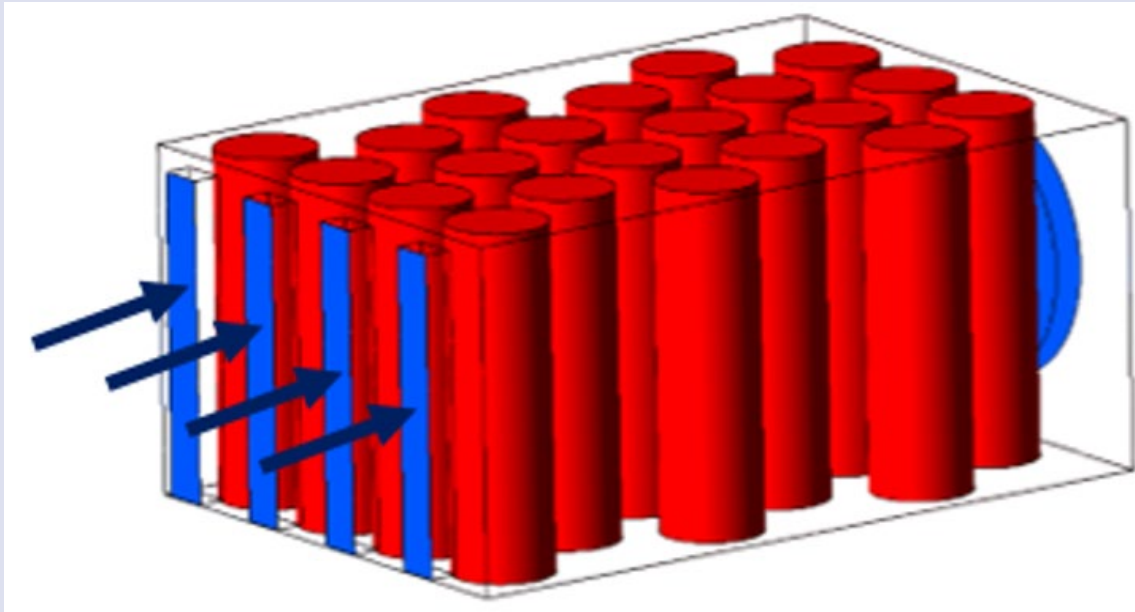
Çalışma boyunca kullanılan standart model batarya kutusunun akış alanı Şekil 1'de verilmiştir.

Standart model batarya kutusu ve 45° açılıya sahip 1,2,3 kademe ara soğutma kanallarının ölçüleri Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Ayrıca pil dizilimleri kanal yapıları da detaylı bir şekilde aktarılmıştır.

Tablo 1. Modellerin sınır şartları.

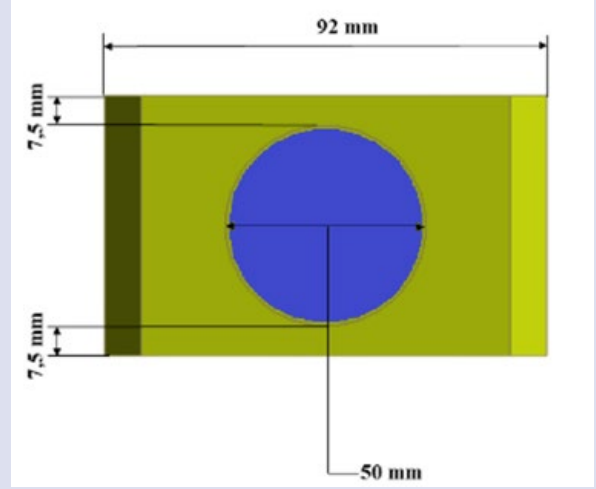
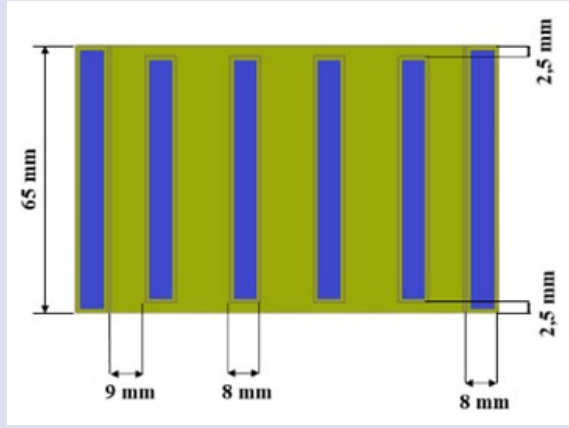
Table 1. Boundary conditions of the models.

Sınır Şartları	Değerler
Isı Üretimi	48750 W/m ³
Giriş Sıcaklığı	299,15 K
Türbülans modeli	Standart k- ϵ
Re aralığı	5000-40000
u	0,86-6,88 m/s

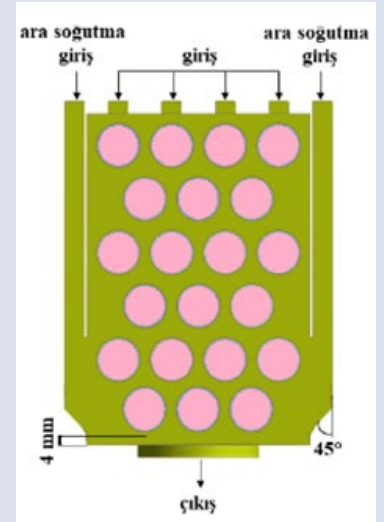
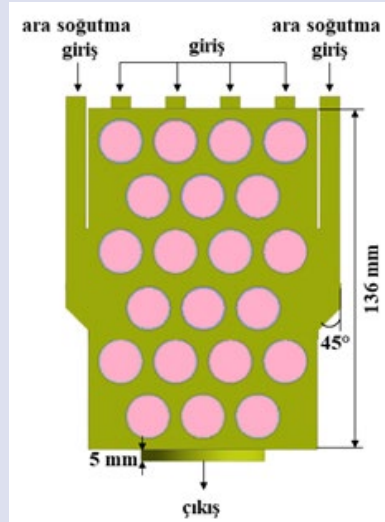
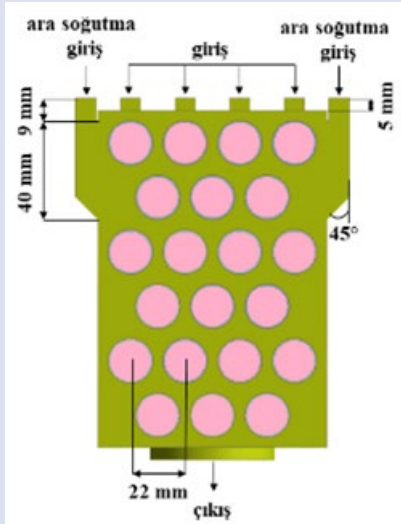


Şekil 1. Standart model akış alanı.

Figure 1. Standard model flow field.



Şekil 2. Batarya modeli giriş ve çıkış ölçüleri.
Figure 2. Inlet and outlet dimensions of the battery model.



Şekil 3. 45° ara soğutma kanallarının ölçüleri.
Figure 3. Dimensions of 45° inter-cooling channels.

Çalışmada havanın giriş sıcaklığı 299,15 K olarak alınmıştır. Batarya modelleri 5000, 10000, 20000 ve 40000 Reynolds değerlerinde test edilmiştir. Giriş hava sıcaklığı referans alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Reynolds sayısı Denklem 1 kullanılarak elde edilmiştir:

$$Re = \frac{\rho * u_0 * D_h}{\mu} \quad (1)$$

Hesaba göre akışkan yoğunluğu ρ , akışkan giriş hızı u_0 , hidrolik çap D_h ve akışkan dinamik viskozitesi μ olarak ifade edilmektedir. Dikdörtgen kanal için hidrolik çap hesabı a ve b dikdörtgenin kenar uzunluklarını ifade edecek şekilde Denklem 2 kullanılarak elde edilmiştir:

$$D_h = \frac{2 * a * b}{a + b} \quad (2)$$

Boyutsuz bir sayı olan Nusselt sayısı Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Nu = \frac{h * D_h}{k} \quad (3)$$

Hesaba göre konvektif ısı transfer katsayısı h , akışkanın ısı iletkenliği ise k olarak ifade edilmektedir. Sürtünmeden kaynaklanan basınç kaybını ifade eden sürtünme faktörü ise Denklem 4 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f = \frac{\Delta P * D_h}{2 * \rho * u_0^2 * L} \quad (4)$$

Burada basınç düşüşü ΔP olarak ifade edilirken kanal uzunluğu ise L olarak ifade edilmektedir.

Isıl ve hidrolik performansın birlikte ifade edildiği performans kriteri (PEC) sayısı Denklem 5 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$PEC = \frac{Nu_b / Nu_m}{f_b / f_m^{(1/3)}} \quad (5)$$

Burada b alt simgesi temel model için, m alt simgesi ise değerlendirilen model için kullanılmaktadır.

Referans alınan (Tuğan ve Yardımcı, 2023) çalışmadaki modelden yola çıkılarak oluşturulan standart modelin ağ yapısından bağımsızlaştırma işlemi yapılmıştır. Ağ yapısından bağımsızlaştırma çalışması 5 çözüm sayısı için gerçekleştirilmiştir. İlk çözümlemede 300806 ağ sayısı kullanılmıştır. Ağ yapısından bağımsızlaştırma işlemi boyunca yapılan çözüm sayısı, toplam ağ sayısı, ΔP değerleri ve

Nusselt sayısı değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Nusselt sayısı toplam ağ sayısı grafiği ise Şekil 4’te verilmiştir.

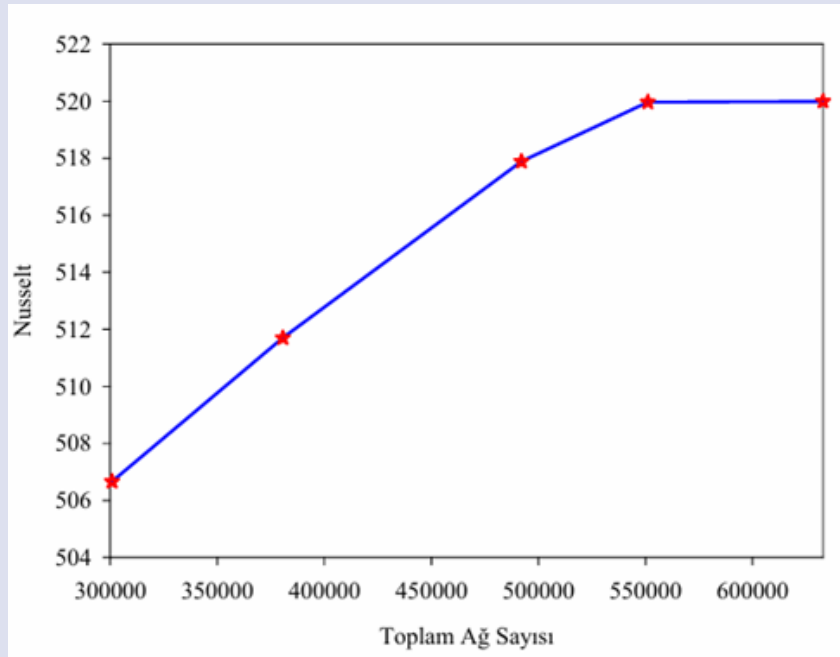
Tablo 2 ve Şekil 4’e göre basınç düşüşüne bakıldığında birbirine yakın artış ve azalışların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ağ sayısının daha fazla artırılmasının basınç düşüşüne bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Nusselt sayısı ilk çözümde 506,6 olarak kaydedilirken üçüncü çözümde 517,8 olarak kaydedilmiştir. Çalışmada hızlı çözüme ulaşmak ve doğru sonuç elde etmek için 551132 ağ sayısı kullanılmıştır. Bu işlemten sonra sayısal çalışmanın doğrulanması işlemine geçilmiştir. Referans çalışmada (Tuğan ve Yardımcı, 2023) kullanılan geometrik modelin sınır şartları kullanılarak giriş hızı 1 m/s, 2 m/s ve 3 m/s değerlerinde çözüm yapılmıştır. Şekil 5’te mevcut çalışma ile Tuğan ve Yardımcı’nın (2023) batarya modelinin ΔP -v grafiği verilmiştir.

Şekil 5’teki grafik incelendiğinde sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu göze çarpmaktadır. Doğrulama işleminden sonra standart model, 45° ara soğutma kademe 1, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 3 modellerinin analizine geçilmiştir.

Tablo 2. Ağ yapısından bağımsızlaştırma çalışması.

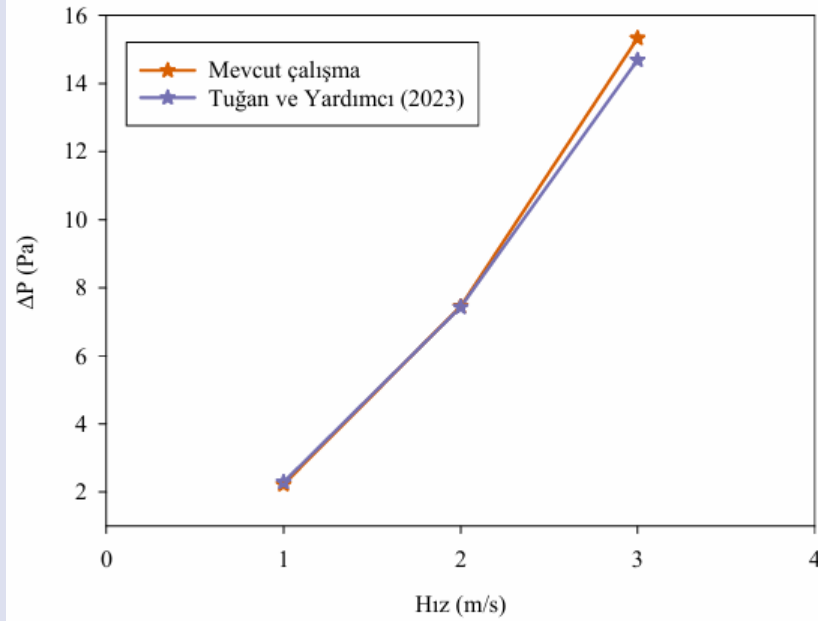
Table 2. Independence from the mesh structure.

Çözüm sayısı	Toplam Ağ Sayısı	ΔP	Nu sayısı
1	300806	20,69	506,6649
2	380571	20,95	511,7011
3	492050	20,93	517,8895
4	551132	20,92	519,9666
5	632942	20,94	519,9261



Şekil 4. Toplam ağ sayısı Nusselt değişimi grafiği.

Figure 4. Plot of total number of meshes-Nusselt change.



Şekil 5. Tuğan ve Yardımcı (2023) batarya modeli ile mevcut çalışmanın basınç düşüşü hız grafiği.
Figure 5. Pressure drop rate graph of Tuğan and Yardımcı (2023) battery model and the present study.

Bulgular

ANSYS Fluent programı yardımıyla yapılan analizler sonucunda standart model, 45° ara soğutma kademe 1, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 3 modellerinin Re= 5000, 10000, 20000 ve 40000 sayılarında ısı transferine etkisi, basınç düşüşüne etkisi, sürtünme faktörüne etkisi, sıcaklık konturları, hız akış çizgileri ve PEC grafiği sırasıyla verilmiştir. Dört farklı Reynolds sayısı değerinde batarya modellerinin ısı transferi incelenmiştir. Şekil 6' da tasarlanan modellerin Re-Nu grafiği verilmiştir.

Şekil 6'ya göre Reynolds sayısı arttıkça her modeldeki Nusselt sayısında da bir artış gözlemlenmiştir. Şekil 7'de basınç düşüşünün Reynolds sayısına göre değişim grafiği verilmiştir.

Şekil 7'deki grafik incelendiğinde en düşük basınç düşüşünün standart modelde gerçekleştiği standart modeli sırasıyla 45° ara soğutma kademe 3, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 1 modellerinin izlediği gözlemlenmiştir. Şekil 8'de sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişim grafiği verilmiştir.

Şekil 8'e göre sürtünme faktörünün en düşük olduğu model standart modelken en yüksek olduğu model 45° ara soğutma kademe 1 modeli olarak kaydedilmiştir.

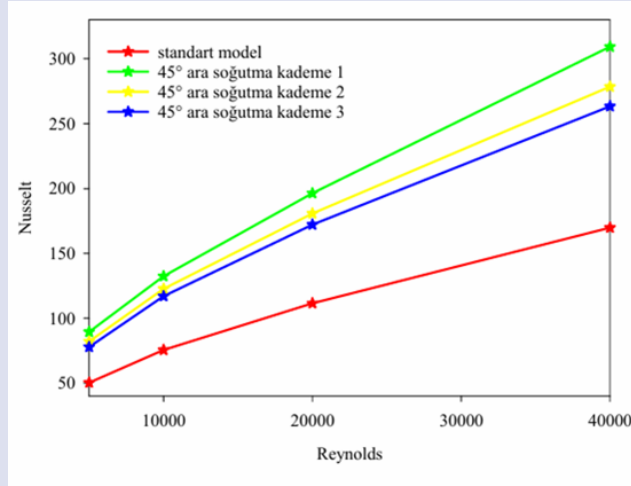
Şekil 9'da Re=10000 değerinde standart model, 45° ara soğutma kademe 1, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 3 modellerinin sıcaklık konturları verilmiştir. Piller arası sıcaklık farkının minimum olduğu, homojen ısı dağılımı en iyi modeller 45° ara soğutma kademe 1 ve 45° ara soğutma kademe 2 modelleri olarak ortaya çıkmıştır. Standart model ve kademe 3 modellerinde çıkış kesatine yakın pillerde aşırı ısınma olduğu görülmektedir.

Şekil 10'da Re=40000 değerinde standart model, 45° ara soğutma kademe 1, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 3 modellerinin sıcaklık konturları verilmiştir. En yüksek sıcaklık değerleri tüm Reynolds sayılarında standart modelde gözlemlenmiştir. Ara soğutma kanalları kullanılan modellerde standart modele göre daha iyi soğutma gözlemlenmiştir. Re= 10000 değerinde standart modelin maksimum sıcaklığı ara soğutma kanalları kullanılarak 309,36 K değerinden 307,30 K değerine düşmüştür. Re= 40000 değerinde ise 303,42 K değerinden 302,45 K değerine düşmüştür.

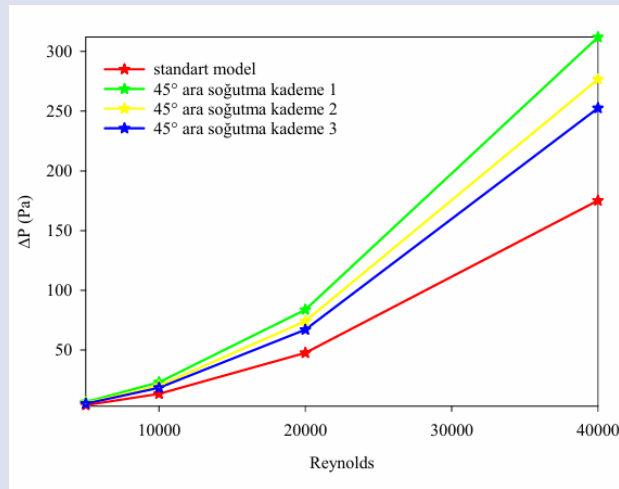
Şekil 11'de bütün modellerin en düşük Re sayısı olan Re=10000 değerinde, Şekil 12'de bütün modellerin en yüksek Re sayısı olan Re= 40000 değerinde hız akış çizgileri verilmiştir. Re= 10000 ve Re= 40000 değerlerinde batarya kanalları boyunca hız akış çizgileri incelendiğinde standart modelde akışın düzenli olduğu ve piller arasındaki düşük hızlı bölgelerin fazla olduğu gözlemlenmiştir. Modeller arasında en dengeli dağılımların 45° ara soğutma kademe 2 modelinde olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 13'te PEC sayısı Reynolds değişim grafiği verilmiştir. PEC sayısı sonuçlarının en iyi olduğu modeller sırası ile 45° ara soğutma kademe 3, 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 1 modelleri olarak gözlemlenmiştir. PEC çalışma aralığının Re= 5000 ve Re= 10000 değerleri arasında en iyi seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

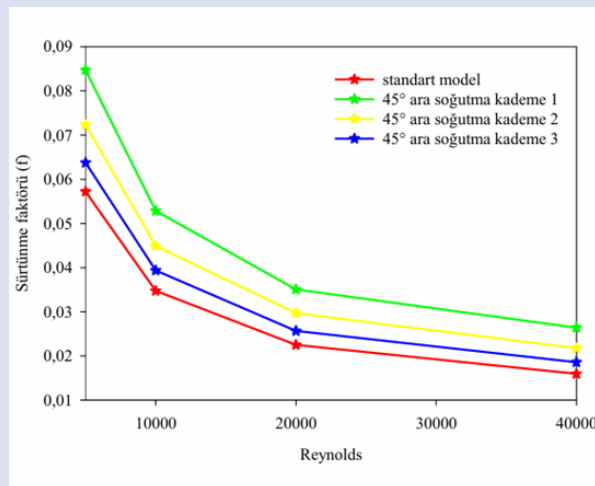
Re= 5000 değerinde 4,16 sayısı ve Re= 10000 değerinde 4,10 sayısı ile diğer modellere göre daha verimli ısı transferi performansının 45° ara soğutma kademe 3 modelinde sağlandığı kaydedilmiştir. Bu durum ısı performans ile hidrolik performans arasındaki durumu ortaya koymaktadır.



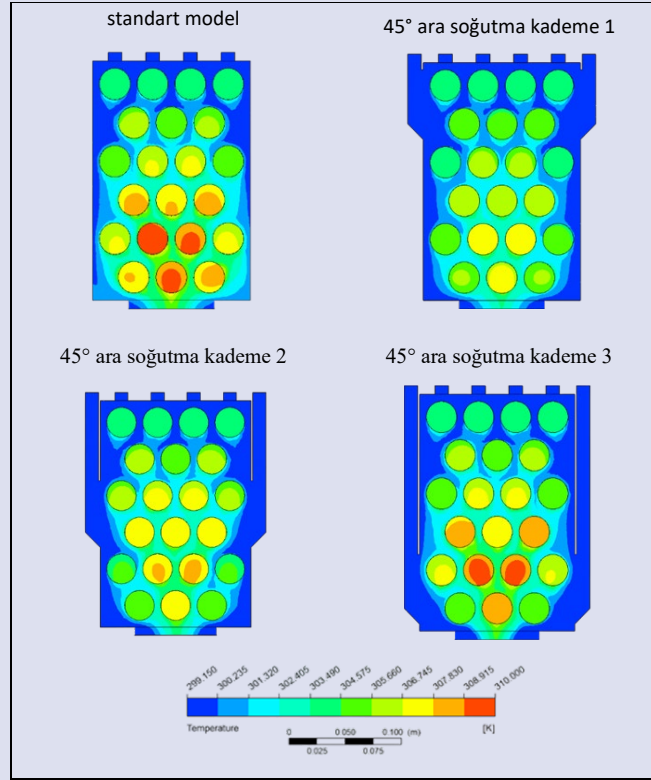
Şekil 6. Re-Nu değişim grafiği.
Figure 6. Re-Nu change graph.



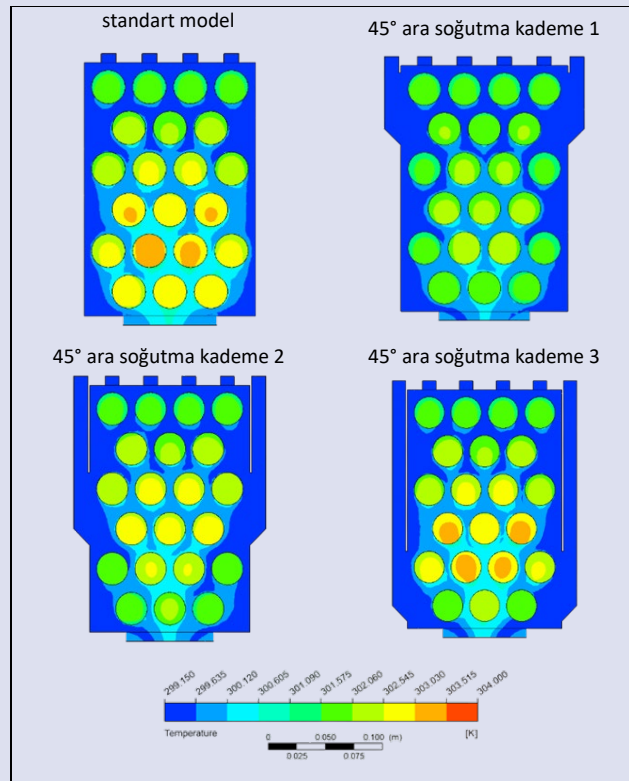
Şekil 7. Re- ΔP değişim grafiği.
Figure 7. Re- ΔP change graph.



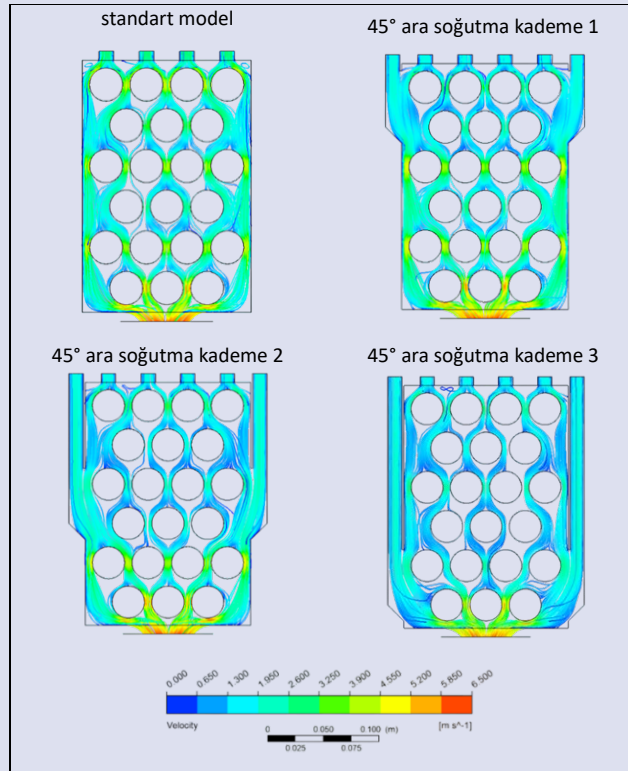
Şekil 8. Re-f değişim grafiği.
Figure 8. Re-f change graph.



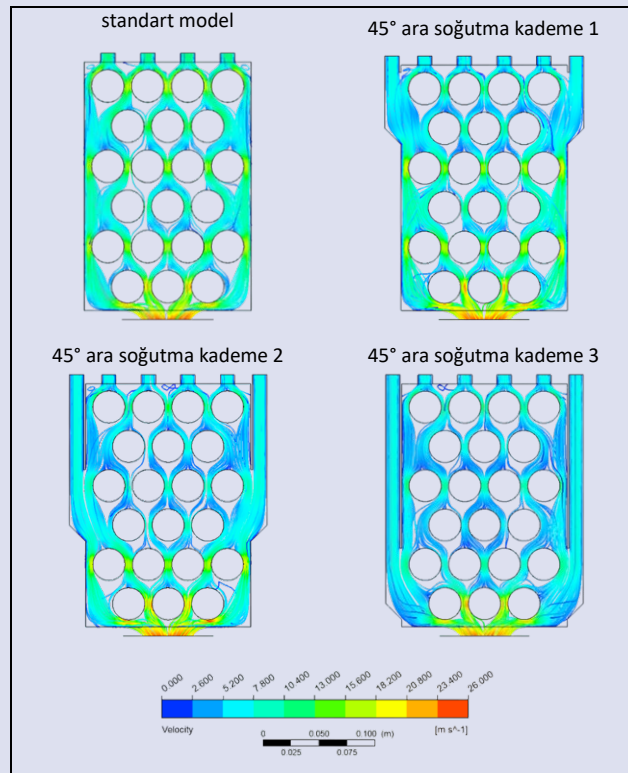
Şekil 9. $Re= 10000$ değerinde sıcaklık konturları.
Figure 9. Temperature contours at $Re= 10000$.



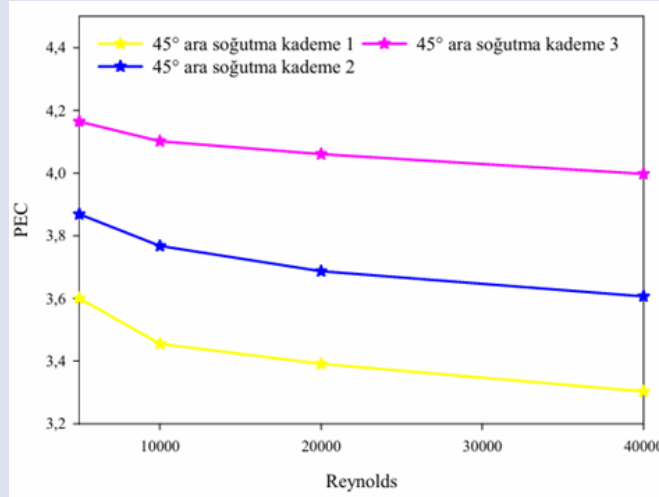
Şekil 10. $Re= 40000$ değerinde sıcaklık konturları.
Figure 10. Temperature contours at $Re= 40000$.



Şekil 11. $Re=10000$ değerinde hız akış çizgileri.
Figure 11. Velocity streamlines at $Re=10000$.



Şekil 12. $Re=40000$ değerinde hız akış çizgileri.
Figure 12. Velocity streamlines at $Re=40000$.



Şekil 13. PEC-Re değişim grafiği.
Figure 13. PEC-Re change graph.

Tartışma

Nusselt sayısı bir akışkan yüzeyi üzerindeki taşınım yoluyla gerçekleşen ısı transferinin ne kadar iyileştiğini ifade eden boyutsuz bir sayıdır. Nusselt sayısının büyüklüğü ısı transferinin iyileşmesi ile doğru orantılıdır. Reynolds sayısı arttıkça Şekil 6'ya göre her modelde Nusselt sayısı bir artış göstermiştir. Standart modele göre ara soğutma modellerinin ısı transferini iyileştirdiği kaydedilmiştir. Basınç düşüşü giriş basıncı ile çıkış basıncı arasındaki farktır ve ne kadar düşük olursa sistem o kadar verimli çalışmaktadır. Şekil 7'de standart model diğer modellere kıyasla daha düşük değerler göstermiştir. Ara soğutma kanalları eklenen modeller türbülansı arttırdığı için basınç düşüşünü yükseltmiştir. 45° kademe 3 modelinin en yüksek değeri vererek soğutma performansını arttırdığı ancak enerji verimliliğini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Sürtünme faktörü akış direncini ifade eden boyutsuz bir sayıdır. Şekil 8'de Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörünün tüm modellerde azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek sürtünme faktörü değeri 45° ara soğutma kademe 1 modelinde kaydedilmiştir. 45° ara soğutma kademe 2 ve 3 modellerinde ise türbülansın artmasıyla sürtünme faktörü değerlerinin de kademeli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10'da sıcaklık konturları incelendiğinde standart modelin ısı yönetiminin yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. 45° ara soğutma kademe 2 modelinin diğer modellerle kıyaslandığında en dengeli sıcaklık dağılımlarını gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12'de hız akış çizgileri incelendiğinde standart modelde akışın düzenli olduğu ve sadece piller arası bölgelerde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.

Bu durum soğutma performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Diğer modellere kıyasla 45° ara soğutma kademe 2 ve 45° ara soğutma kademe 3 modellerinin daha dengeli akış profili gösterdiği kaydedilmiştir. 45° ara soğutma kademe 2 modelinde oluşan türbülansın kabul edilebilir seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. PEC sayısı, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörüne bağlı olarak ısı transferi performansının bir ölçütüdür. PEC sayısının 1' den büyük olması basınç düşüşüne rağmen ısı transferinin arttığını göstermektedir (Koca ve Güder,

2022; Koca ve Zabun, 2021; Yıldız, Koca ve Can, 2024). Şekil 13'te 45° ara soğutma kademe 3 modelinde diğer modellere göre daha verimli ısı transferi sağlandığı gözlemlenmiştir. Isıl ve hidrolik performansın bir arada ele alındığı PEC sayısına göre kademe 3 modeli ön plana çıkmaktadır. Batarya modüllerinde göz ardı edilmemesi gereken en önemli parametrelerden birisi de homojen ısı dağılımının elde edilmesidir. Hız konturlarından bu homojenliğin kademe 2 modelinde daha fazla sağlandığı görülmektedir.

Sonuç

Bu çalışmada, 21 adet 18650 tipi lityum-iyon pilden oluşan bir batarya paketinde, ısı transferini artırmak amacıyla yerleştirilen ara soğutma kanallarının etkisi incelenmiştir. Standart model ve 45° açıda üç farklı kademeye sahip toplam 4 farklı model tasarlanmıştır. Soğutma akışkanı olarak hava seçilmiştir. Lityum-iyon piller için sabit ısı üretimi uygulanmıştır. Isı transferi $Re=5000, 10000, 20000$ ve 40000 değerlerinde analiz edilmiştir. Analizler sonucunda ara soğutma kanalları eklenen batarya modellerinde Nusselt sayıları standart modele kıyasla daha yüksek değerler göstermiştir. 45° ara soğutma kademe 1 modelinde ısı transferinin en iyi düzeyde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Ara soğutma kanalları kullanılan modellerin oluşturduğu türbülansa bağlı olarak basınç kayıpları yükselmiştir. En yüksek basınç kaybı 45° ara soğutma kademe 1 modelinde gözlemlenmiştir. Ara soğutma kanallarının var olduğu modellerde basınç kaybının en az olduğu model kademe 3 modelidir. Enerji verimliliği ve ısı transferi birlikte değerlendirildiğinde, PEC sayısı ele alınmış ve en iyi performansı gösteren 45° ara soğutma kademe 3 modeli ortaya çıkmıştır. Batarya modüllerinde göz ardı edilmemesi gereken en önemli parametrelerden birisi de homojen ısı dağılımının elde edilmesidir. Hız konturlarından bu homojenliğin kademe 2 modelinde daha fazla sağlandığı görülmektedir. Bütün sonuçlar değerlendirildiğinde ara soğutma kanallarının elektrikli araç teknolojilerinde batarya soğutma uygulamaları için önemli potansiyele sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Kaynaklar

- Aktaş, M., Baygüneş, B., Kıvrak, S., Çavuş, B., & Sözen, F. (2020). Elektrikli araç için düşük maliyetli bir batarya yönetim sistemi tasarımı ve gerçekleştirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 227, 227–238. <https://doi.org/10.31590/ejosat.779720>
- Bulut, E. (2022). *Elektrikli araçlarda batarya termal yönetim sistemlerinin optimum tasarımı* (Doktora tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Celen, A., & Kaba, M. Y. (2021). Elektrikli araçlarda kullanılan silindirik lityum iyon bataryaların soğutulmasının parametrik incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 49–61.
- Chung, Y., & Kim, M. S. (2019). Thermal analysis and pack level design of battery thermal management system with liquid cooling for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 196, 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.082>
- Eğin, G. (2019). *Elektrikli araçların batarya sistemlerinde ısı yönetimi* (Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Elmi, M. A., & Zhao, P. (2024). Review of thermal management strategies for cylindrical lithium-ion battery packs. *Batteries*, 10, 50. <https://doi.org/10.3390/batteries10020050>
- E, J., Yue, M., Chen, J., Zhu, H., Deng, Y., Zhu, Y., Zhang, F., Wen, M., Zhang, B., & Kang, S. (2018). Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle. *Applied Thermal Engineering*, 144, 231–241.
- Hasan, H. A., Togun, H., Abed, A. M., Biswas, N., & Mohammed, H. I. (2023). Thermal performance assessment for an array of cylindrical lithium-ion battery cells using an air-cooling system. *Applied Energy*, 346, 121354. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121354>
- Hamurcu, M., Çakır, E., & Eren, T. (2021). Kullanıcı perspektifli çok kriterli karar verme ile elektrikli araçlarda batarya seçimi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi (International Journal of Engineering Research and Development)*, 13(2), 733–749. <https://doi.org/10.29137/umagd.906805>
- Kim, C., Han, J., & Hong, S. (2022). Evaluation of spoiler model based on air cooling on lithium ion battery pack temperature uniformity. *Processes*, 10(3), 505. <https://doi.org/10.3390/pr10030505>
- Koca, F., & Güder, T. B. (2022). Numerical investigation of CPU cooling with micro-pin-fin heat sink in different shapes. *The European Physical Journal Plus*, 137, 1276. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03489-7>
- Koca, F., & Zabun, M. (2021). The effect of outlet location on heat transfer performance in micro pin-fin cooling used for a CPU. *The European Physical Journal Plus*, 136, 1115. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02113-4>
- Menak, R., Karadağ, T., Altuğ, M., & Tan, N. (2021). Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemleri üzerine bir derleme çalışması [A review study on battery management systems in electric vehicles]. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(2), 581–594. <https://doi.org/10.24012/dumf.941851>
- Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 110, 377–382.
- Qian, Z., Li, Y., & Rao, Z. (2016). Thermal performance of lithium ion battery thermal management system by using mini channel cooling. *Energy Conversion and Management*, 126, 622–631. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.063>
- Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419–2430. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.048>
- Tuğan, V., & Yardımcı, U. (2023). Numerical study for battery thermal management system improvement with air channel in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 72, 108515. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108515>
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365–385. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.130>
- Yildiz, E., Koca, F., & Can, I. (2024). Optimal design and analysis of the cooled turbine blade in gas turbines with CFD. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 18(1), 60–72. <https://doi.org/10.47176/jafm.18.1.2853>



Investigation of SiO₂ Nanoparticle Reinforced Epoxy Composites Produced by Additive Manufacturing: Effect of Silanization on Conversion Degree and Mechanical Properties

Berk Özler^{1,a,*}, Serdar Yıldırım^{2,b}

¹ Department of Metallurgical and Materials Engineering, University of Izmir Katip Celebi, 35620, Izmir, Türkiye

² Department of Metallurgical and Materials Engineering, University of Dokuz Eylul, 35390, Izmir, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 09/01/2025

Accepted: 01/03/0025

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

3D printers have revolutionized many areas such as aviation, dentistry, health, construction, food, pharmacy and tissue engineering by forming the basis of additive manufacturing technology. These devices, which work by adding material layer by layer, combine with CAD software to enable the rapid and efficient production of complex designs. DLP printers in the photochemical category stand out in medical applications by polymerizing photosensitizer resins with UV light. While inorganic fillers in these resins increase mechanical properties, excessive use can increase viscosity and reduce printing performance. Although SiO₂ nanoparticles increase transparency and durability, their tendency to clump negatively affects mechanical properties. By coating the surface of these particles with the silanization method, they are better bonded with the resin, thus improving the integrity and mechanical strength of the structure. In this study, the aim is to investigate the effects of the silanization process on the mechanical properties and conversion degree of particles in epoxy composite materials reinforced with SiO₂ nanoparticles. For this purpose, nanoparticles synthesized by the sol-gel method and subjected to the silane coating process were added to the epoxy resin at different rates and produced with a DLP type 3D printer. In the study, critical parameters such as the compatibility of coated and uncoated nanoparticles with the resin matrix, the viscosity properties of the material, mechanical strength and conversion degree were evaluated with detailed analyses. The highest conversion degree increase (24.4%) occurred in the 2 wt.% silane-coated SiO₂ sample. The 1 wt.% silane-coated SiO₂ sample showed the greatest tensile strength (66.4%), and modulus increase (10.5%), while the 2 wt.% silane-coated SiO₂ sample had the highest flexural strength increase (5.1%). The obtained results revealed the effect of silane coating on increasing the performance of the material.

Keywords: Additive manufacturing, nanocomposite, silanization, mechanical properties, conversion degree.

Araştırma Makalesi

Süreç

Geliş: 09/01/2025

Kabul: 01/03/0025

ÖZ

3D yazıcılar, eklemeli üretim teknolojisinin temelini oluşturarak havacılık, diş hekimliği, sağlık, inşaat, gıda, eczacılık ve doku mühendisliği gibi birçok alanda devrim yaratmıştır. Malzemeyi katman katman ekleyerek çalışan bu cihazlar, CAD yazılımlarıyla birleşerek karmaşık tasarımların hızlı ve verimli bir şekilde üretilmesini sağlamaktadır. Fotokimyasal kategorideki DLP yazıcılar, fotosensitizör reçinelerini UV ışığıyla polimerize ederek tıbbi uygulamalarda öne çıkmaktadır. Bu reçinelerdeki inorganik dolgular mekanik özellikleri artırırken, aşırı kullanımı viskoziteyi artırarak baskı performansını düşürebilmektedir. SiO₂ nanopartikülleri şeffaflığı ve dayanıklılığı artırmaya rağmen, topaklanma eğilimleri mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Bu partiküllerin yüzeyinin silanizasyon yöntemi ile kaplanmasıyla reçineyle daha iyi bağlanmaları sağlanmakta, böylece yapının bütünlüğü ve mekanik mukavemeti artmaktadır. Bu çalışmada, SiO₂ nanopartikülleri ile takviye edilmiş epoksi kompozit malzemelerde silanizasyon işleminin partiküllerin mekanik özellikleri ve dönüşüm derecesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla sol-jel yöntemi ile sentezlenen ve silan kaplama işlemine tabi tutulan nanopartiküller farklı oranlarda epoksi reçinesine eklenerek DLP tipi 3D yazıcı ile üretilmiştir. Çalışmada, kaplanmış ve kaplanmamış nanopartiküllerin reçine matrisi ile uyumluluğu, malzemenin viskozite özellikleri, mekanik mukavemet ve dönüşüm derecesi gibi kritik parametreler detaylı analizlerle değerlendirilmiştir. En yüksek dönüşüm derecesi artışı (%24,4) ağırlıkça %2 silan kaplı SiO₂ içeren numunede meydana gelmiştir. Ağırlıkça %1 silan kaplı SiO₂ içeren numune ise çekme mukavemetinde (%66,4) ve elastisite modülünde (%10,5) en iyi artışı göstermiştir. Ağırlıkça %2 silan kaplı SiO₂ içeren numunenin ise en yüksek eğilme mukavemeti artışına (%5,1) sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, silan kaplamanın malzemenin performansını artırma etkisini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, nanokompozit, silanizasyon, mekanik özellikler, dönüşüm derecesi..

^a berk.ozler@ikcu.edu.tr

^{id} 0000-0003-1819-6032

^b serdar.yildirim@deu.edu.tr

^{id} 0000-0002-3730-3473

How to Cite: Ozler B, Yıldırım S. (2023) Investigation of SiO₂ Nanoparticle Reinforced Epoxy Composites Produced by Additive Manufacturing: Effect of Silanization on Conversion Degree and Mechanical Properties, Journal of Science and Technology, 4(1): 12-20.

Introduction

In recent years, 3D printers have become highly regarded and influential within the field of additive manufacturing technology. These cutting-edge devices have transformed the production of intricate and complex geometric designs, surpassing traditional methods like casting and machining. Since their emergence in the 1980s, 3D printers have attracted significant attention due to their exceptional ability to produce multiple objects simultaneously (Chen et al., 2019). The additive manufacturing process they utilize involves layering material sequentially from a starting point on a platform to create three-dimensional objects. This process is repeated until the final product is complete. Essentially, this technology represents a robotic adaptation of age-old manufacturing practices, akin to building a brick wall. By leveraging CAD (Computer-Aided Design) software, 3D printers play a crucial role in designing and fabricating detailed three-dimensional models (Horvath, 2014). Advancements in the field have significantly broadened the potential applications of 3D printers in recent years. Their improved efficiency, sustainability, and accelerated production capabilities, in alignment with the principles of Industry 4.0, have enabled their adoption across a range of disciplines, including arts, civil construction, food, healthcare, aerospace, dentistry, the pharmaceutical industry, tissue engineering and biomaterials (A. L. Silva, Salvador, Castro, Carvalho, & Munoz, 2021; Zhang & Xiao, 2018).

Three-dimensional printers can be classified according to their manufacturing methods, which include photochemical, electrical, and mechanical processes. DLP (Digital Light Processing) printers, which fall into the photochemical category, have become extremely common, especially in medical applications. These types of printers use ultraviolet (UV) light to photopolymerize photosensitive resins that shape the final product. The main constituents of these resins are oligomers, monomers, and photoinitiators. In certain instances, color pigments and fillers (nano and/or microparticles) might also be included (Zhang & Xiao, 2018). Photoinitiators drive the photopolymerization process, creating a polymer through cross-linking. The conversion degree and mechanical properties of a polymer are directly influenced by these cross-links. Additionally, incorporating inorganic fillers into the resin structure can increase the strength and density of cross-links, further enhancing the conversion degree and mechanical properties of the material (Aati, Akram, Ngo, & Fawzy, 2021; Al-Turaif, 2010; N. Bahremandi Tolou, M. H. Fathi, A. Monshi, V. S. Mortazavi, & M. Mohammadi, 2013; Pehlivan & Karacaer, 2014). However, in addition to this improvement, inorganic fillers can increase the viscosity of the resin and, when exceeded to a certain level, may have negative effects on printability material (Bao, Paunović, & Leroux, 2022).

In medical applications, such as dentistry and tissue engineering, achieving a high conversion degree and superior mechanical properties are crucial. A key strategy to enhance these properties is the dispersion of SiO₂ nanoparticles (NPs) within the resin matrix. These NPs are highly valued for their outstanding mechanical attributes and their ability to maintain the transparency of resin (Rezvani, Atai, Hamze, &

Hajrezai, 2016). However, a significant limitation of SiO₂ NPs is their tendency to agglomerate, which reduces the effective surface area in contact with the resin and negatively impacts mechanical properties (Pehlivan & Karacaer, 2014). To overcome this issue, silanization is employed. Silanization is a process of applying silane groups to the particle surfaces. This coating prevents NP aggregation and promotes better bonding with the resin matrix, reinforcing overall structural integrity (Neibloom, Bevan, & Frechette, 2020; Nguyen et al., 2020; Tham, Chow, & Ishak, 2010).

In this study, silane-coated and uncoated SiO₂-reinforced epoxy matrix nanocomposites were produced using a DLP type 3D printer. The mixtures were prepared in different ratios with and without coating. The viscosities of the prepared resins were examined, and the printing process was initiated. Comprehensive characterization tests were carried out on the materials before and after the printing process. The effect of the silanization process applied to the NPs in the structure on conversion degree and mechanical properties was investigated.

Material and Method

The SiO₂ NPs utilized in the present study were synthesized via a sol-gel method, employing tetraethylorthosilicate (TEOS) as the starting material. Ethanol (EtOH) and ammonia (NH₃) were utilized as organic solvent and catalyst, respectively. Ammonia was incorporated into the solution prepared by adding TEOS to EtOH with the objective of accelerating the gelation process. Subsequently, the solution was stirred and aged at room temperature until it became gel. The obtained gel was then dried at 250 °C and calcined at 600 °C to yield the desired NP product. Subsequently, the silanization process of the synthesized powders was carried out using 3-(trimethoxysilyl)propylmethacrylate (MPS). The obtained powders were mixed by incorporating them into a solution containing ethanol (EtOH) and MPS. During the mixing process, ammonia was added to the solution with MPS to enhance the bonding of organic structures to the SiO₂ NP surface. The resultant powders, which were stirred at room temperature for 24 hours, were then subjected to a centrifugation method to precipitate the desired material. Subsequent to this step, the powders were purified from the solution using EtOH, followed by drying at 70 °C, thereby completing the silane coating process.

Photosensitive epoxy resin (Standard Resin, AnyCubic) was utilized as the matrix material for the composite materials under investigation. Coated (C) and uncoated (U) NPs were incorporated into the resin at ratios of 0% (Pure), 0.5%, 1%, 2%, and 5% by weight. The contents and acronyms of the nanocomposites obtained are listed in Table 1. The mixture was thoroughly blended using a magnetic stirrer. Following the attainment of a homogeneous distribution, the printing process was executed using a DLP type 3D printer (Halot-Sky CL89, Creality). Layer thickness and exposure time, referred to as printing parameters, were set to 50 µm and 5 s, respectively, ensuring consistency across all samples. After printing, each composite was subjected to a cleaning procedure involving an isopropyl alcohol bath in a washer

and curing device (UW-02, Creality). Then, the composites were exposed to a post-curing process under UV light for a duration of one hour.

Table 1. Acronyms and contents of the nanocomposites.

Name	Uncoated SiO ₂ (wt. %)	Name	Coated SiO ₂ (wt. %)
U5	0.5	C5	0.5
U10	1	C10	1
U20	2	C20	2
U50	5	C50	5

Structural and thermal properties of the synthesized SiO₂ NPs were determined by an X-ray diffractometer (XRD) and thermogravimetric analysis (TGA), respectively. Cu-K α radiation (1.5406 Å) was used in the XRD measurement (ARL X'TRA, Thermo Scientific) in order to acquire diffraction patterns for a 2 θ value. For all samples, XRD data were obtained at a scan rate of 2 °/min within the 10°≤2 θ ≤80° range. TGA (STA 8000, PerkinElmer) was performed in N₂ atmosphere by heating at a rate of 10 °/min to a temperature of 800 °C. Organic bond structures and conversion degrees of NPs and composites were ascertained through the use of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and their morphological properties were determined using scanning electron microscopy (SEM). FTIR (Nicolet iS10, Thermo Scientific) analysis was performed with 32 scans for each sample in the range of 500 to 4000 cm⁻¹ wavenumber. SEM (Gemini 560, Zeiss) images were obtained using secondary electron mode at 5 kV voltage with the magnification of 50K and 100K for NPs, back-scattered electron mode at 15 kV voltage with the magnification of 5K for composites. Viscosity properties of the Pure and composite resins were measured by a rheometer (CVO Rheometer System, Bohlin Instruments). The measurement was executed using the cone and plane method, employing a cone with a 2° angle and maintaining a 100 μ m distance between the planes. The shear rate range was configured within the range of 0 to 1000 1/s, and measurements were obtained at room temperature for a duration of 120 seconds. The mechanical properties of the composite samples were determined by performing tensile (AG-IS, Shimadzu) and three-point bending (AG-50kNG, Shimadzu) tests. Three specimens were used for testing and an average value of the results was used. In both tests, the speed was set to 1 mm/min, and cylindrical

supports were used as spans with a span-to-depth ratio of 16:1 in the three-point bending test.

Results and Discussion

Particle Characterization

The structural and thermal properties of the NPs were determined by TGA and XRD. The temperature-dependent weight loss (%) for the produced SiO₂ xerogel is demonstrated in Figure 1a. A detailed examination of the graph reveals that the weight loss between 70 and 150 °C corresponds to the removal of water and moisture, and the weight loss between 180 °C and 550 °C corresponds to the combustion of organic components such as alkyl groups (-CH₂CH₃) and the removal of -OH groups from SiOH (Zornoza-Indart & López-Arce, 2015). Given the absence of phase transition in the structure and the occurrence of linear weight loss from 600 °C, it was considered reasonable to execute the calcination process of the synthesized particles at this temperature.

The X-ray diffraction (XRD) profile of the synthesized SiO₂ NPs is shown in Figure 1b. The broad dominant peak obtained as a result of the analysis indicates that the derived SiO₂ NPs are amorphous because they do not exhibit a crystalline structure, and the lack of any additional peaks in the spectrum indicates that there are no impurities from the synthesis process, resulting in a pure composition (Varshney, Nigam, Pawar, & Mishra, 2022), (Dubey, Rajesh, & More, 2015).

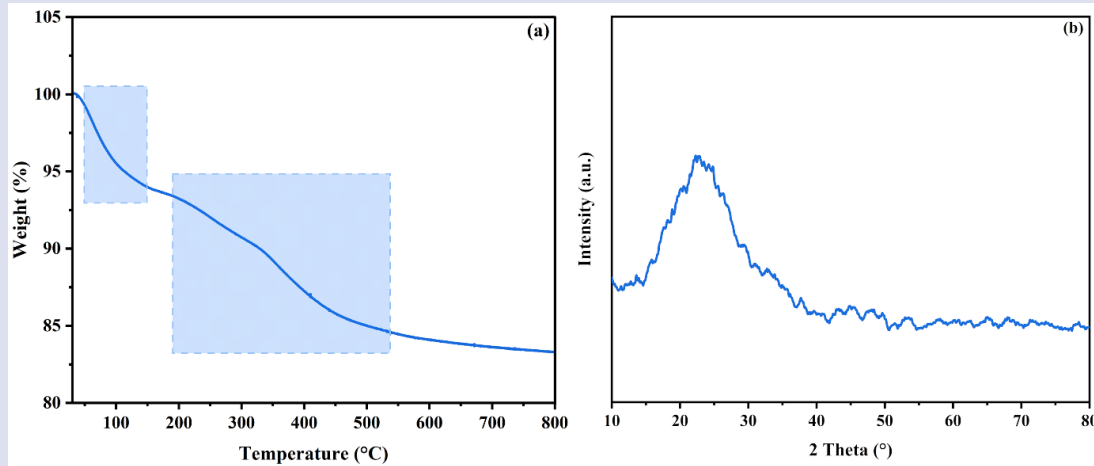


Figure 1. Thermogravimetric analysis (a) and X-ray diffractometer analysis (b) of SiO₂ xerogel and NPs, respectively.

Morphological Properties

The morphological properties of NPs and composites were investigated by SEM analysis. The examination of NP samples was conducted in secondary electron mode, while composites were analyzed using backscattered electron mode. Representative images of NPs and composites at 50K and 100K magnifications for NPs and 5K magnification for composites are presented in Figure 2.

In order to ascertain their true shape and size, SEM analysis of the NPs was carried out before the silanization process. The examination of Figure 2a and 2b, images reveal the presence of particle agglomeration. Upon further examination of the sizes of small particles within agglomerated particles, it was revealed that there are spherical particles randomly distributed in the range of 40 - 100 nm. The composite samples, comprising both uncoated and coated samples with a 1% SiO₂ additive (designated as U10 and C10, respectively), were subjected to examination from the cross-sectional area. The presence of SiO₂ NPs is indicated by white dots in the matrix material. A comparison of the images reveals that the particles are predominantly in large clusters in Figure 2c and in smaller clusters and a single structure in Figure 2d. It was observed that the silane-coated

samples exhibited a behavior consistent with the findings reported in the extant literature (Mussatto, Oliveira, Subramani, Papaléo, & Mota, 2020; Rossi Canuto de Menezes et al., 2021).

Viscosity Properties

The viscosity properties of pure and composite resins were determined by rheometer measurement, and the obtained results are presented in Figure 3 and Table 2. Upon examination of these values, it was observed that NP addition generally increased viscosity, while silane-coated particles increased it even more than uncoated particles. Since the viscosity values remained constant at the measured shear rate, no thixotropic or non-Newtonian behavior was observed. A subsequent comparison of the findings with the extant literature revealed their consistency with the results reported in a study by Mohsen and Craig. The silane-coated samples exhibited enhanced interaction with the matrix material, attributable to the presence of organic compounds on their surfaces, thereby reducing fluidity (Mohsen & Craig, 1995).

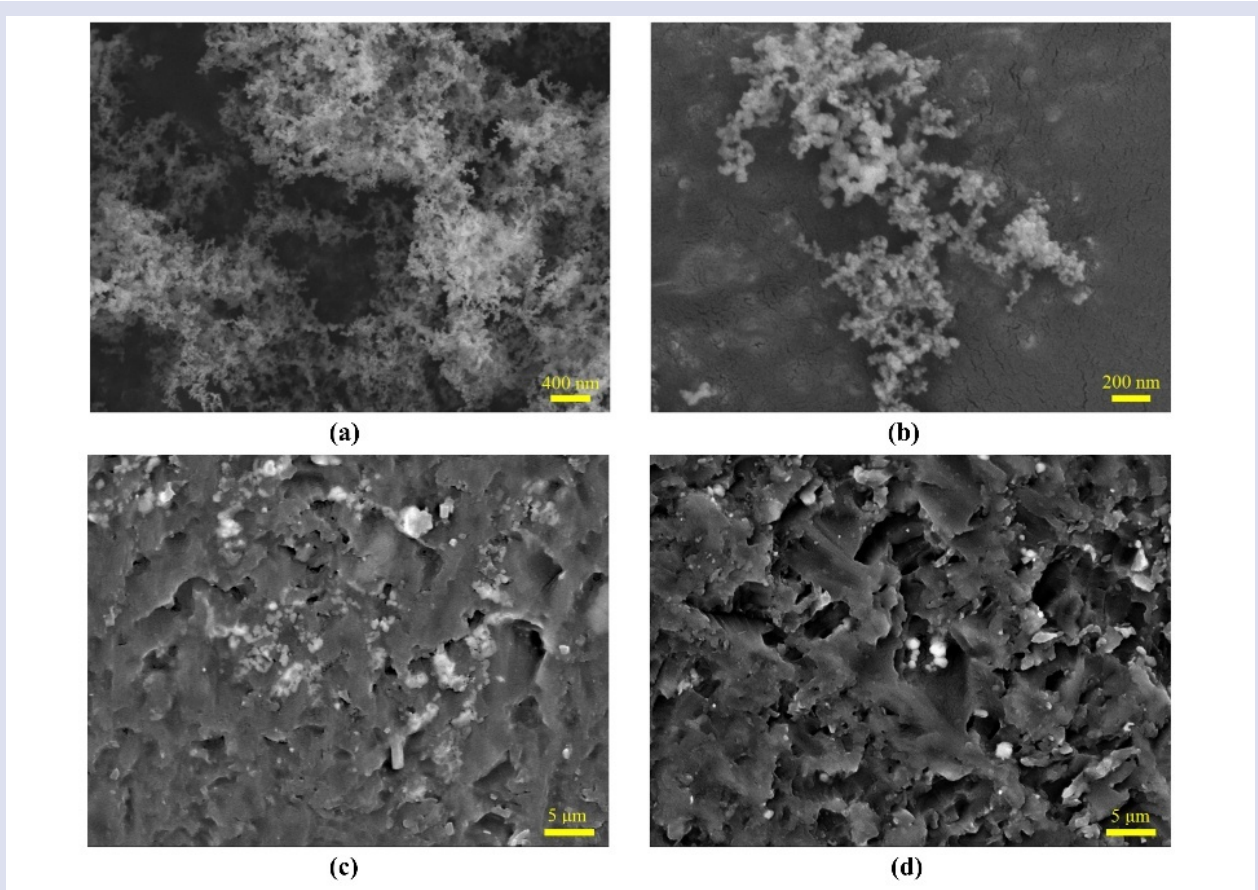


Figure 2. SEM images of SiO₂ NPs and composites. NPs at (a) 50K and (b) 100K magnification, and (c) U10 and (d) C10 samples at 5K magnification.

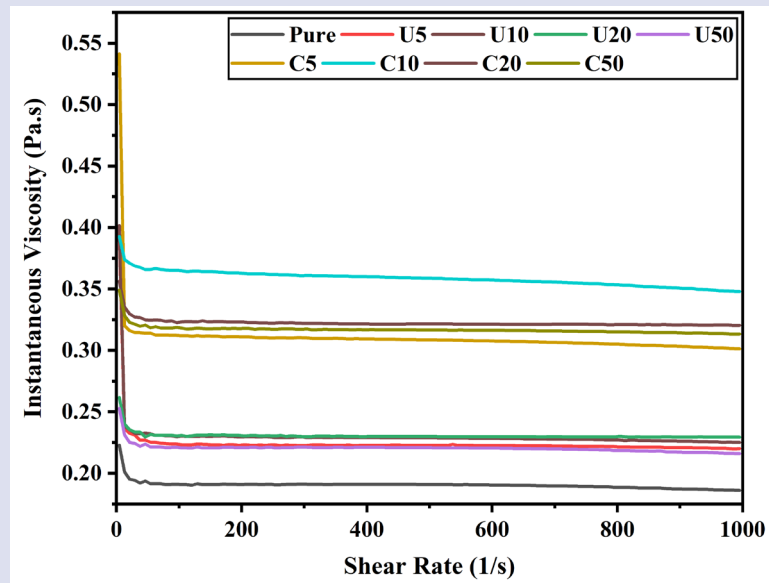


Figure 3. Instantaneous viscosities against shear rate of pure and composite resins.

Table 2. Instantaneous viscosity values of pure and composite resins.

Name	Viscosity (Pa.s)	Name	Viscosity (Pa.s)
Pure	0.19	C5	0.3
U5	0.22	C10	0.35
U10	0.23	C20	0.32
U20	0.23	C50	0.31
U50	0.22		

Organic Bond Properties

FTIR analysis of the NPs was conducted to ascertain the modifications in organic bond structure that occurred due to silanization. The FTIR spectra of uncoated and coated particles are presented in Figure 4. Upon examination of the graph, peaks at wave numbers of 1046 and 795 cm^{-1} , which are common to both spectra, were identified. These peaks are known to correspond to Si-O-Si stretching and O-Si-O bending bonds, respectively. Consequently, the presence of these peaks is expected in both samples. (Moncada, Quijada, & Retuert, 2007) (see Figure 4). Upon zooming in on the graph, it was determined that the peak at the shared wave number of 1633 cm^{-1} originated from the hydroxyl groups trapped in the SiO_2 structure and could also overlap with the C=C vibration in the MPS structure (Rong, Chen, Wu, & Wang, 2005; Siddiquey, Ukaji, Furusawa, Sato, & Suzuki, 2007). The peaks at 1455 and 1716 cm^{-1} were identified as belonging to the C-H stretching and C=O vibration, respectively, within the MPS structure (Nguyen et al., 2020). The successful silanization process was confirmed through the identification of these bonds via FTIR analysis.

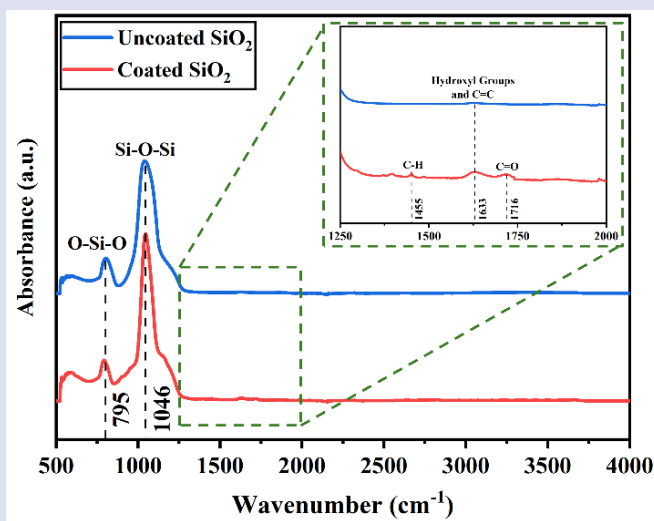
The conversion degrees of pure and composite resins following polymerization were determined by FTIR analysis, with the analysis applied to each sample before and after polymerization for the conversion degree calculation. The conversion degree calculation enables the determination of the polymerization capabilities of the materials by calculating the conversion rate of C=C double bonds in their structures to C-C single bonds as a result of cross-linking of monomers. The conversion degree calculation was carried out by using Equation

(1) given in Barszczewska-Rybarek's study (Barszczewska-Rybarek, 2012).

$$DC = 1 - \left(\frac{A_{C=C(t)}}{A_{C=C(0)}} \right) \times 100 \quad (1)$$

In the equation, $A_{C=C}$ is the intensity of the peak that corresponds to the C=C double bond at 1637 cm^{-1} wavenumber, as can be seen in Figure 5a. The symbols (0) and (t) next to the $A_{C=C}$ are used to denote the intensity values of this peak before and after polymerization, respectively. The conversion degrees of pure and composite samples, as calculated according to Equation 1, are presented in Figure 6.

As demonstrated in Figure 5b, the silanization process exhibited a considerable positive impact on the conversion degree. It is hypothesized that this phenomenon leads to an enhancement in the conversion degree through the formation of bonds between the silane groups present on the NP surface and the acrylate groups embedded within the resin matrix during the polymerization process. This increased bonding facilitates the formation of additional crosslinks, contributing to an overall increase in the conversion degree. Among the composite samples, the highest increases were observed in C5 and C20 samples, with 23.8% and 24.4% increases, respectively. The observed decrease in the conversion degree of the U20 sample is hypothesized to be attributed to the restriction of polymerization resulting from NP agglomeration (Sodagar, Bahador, Khalil, Saffar Shahroudi, & Zaman Kassaei, 2013).

Figure 4. FTIR spectrum of uncoated and coated SiO_2 NPs.

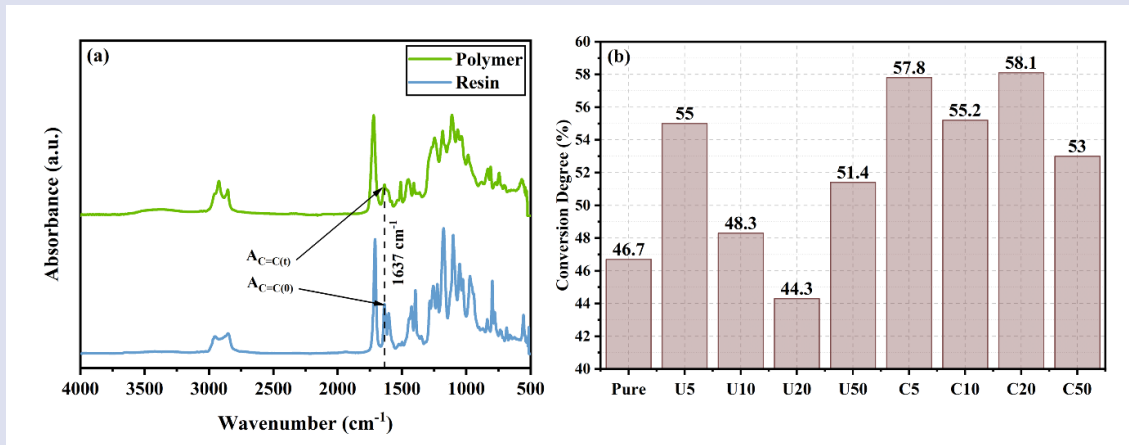


Figure 5. (a) FTIR spectrum of pure sample before and after polymerization and (b) conversion degrees of pure and composite samples.

Mechanical Properties

Tensile and three-point bending tests were applied to determine the strengths of pure and composite materials. Tensile and flexural strength values are shown in Figures 6a and 6b, respectively, while Figure 6c shows the modulus of elasticity values obtained by the tensile test. In addition, the results are presented in comprehensive detail in Table 3. A general observation indicates that the effect of SiO₂ NP reinforcement on strength values up to 0.5 wt.% is positive. However, as the ratios increase, the strength value begins to decrease. This observation is consistent with the findings reported in the study by Da Silva et al. (L. H. da Silva, Feitosa, Valera, de Araujo, & Tango, 2012), which showed that the addition of SiO₂ has a positive impact on the mechanical properties up to a certain extent. However, in samples containing silane-coated NPs, a general increase occurred compared to uncoated samples and this increase continued

up to 2%. It was also confirmed by Gad et al. that this increase in mechanical properties occurred as a result of the reduction of stress concentration regions within the structure due to the silanization process reducing agglomeration (Gad et al., 2020). However, a decrease in strength values occurs after 2 wt.% silane-coated SiO₂ NP content. This situation caused a decrease in mechanical properties as the agglomeration of NPs increased again with the additions made after 2%.

The enhancement of mechanical properties is directly proportional to the conversion degree. As the cross-links in the structure are covalent bonds, and the number of these bonds increases, the network structure becomes denser, resulting in more homogeneous energy distribution within the material. This also reduces crack formation and propagation, thereby increasing the material's resistance to mechanical forces (Huang et al., 2022).

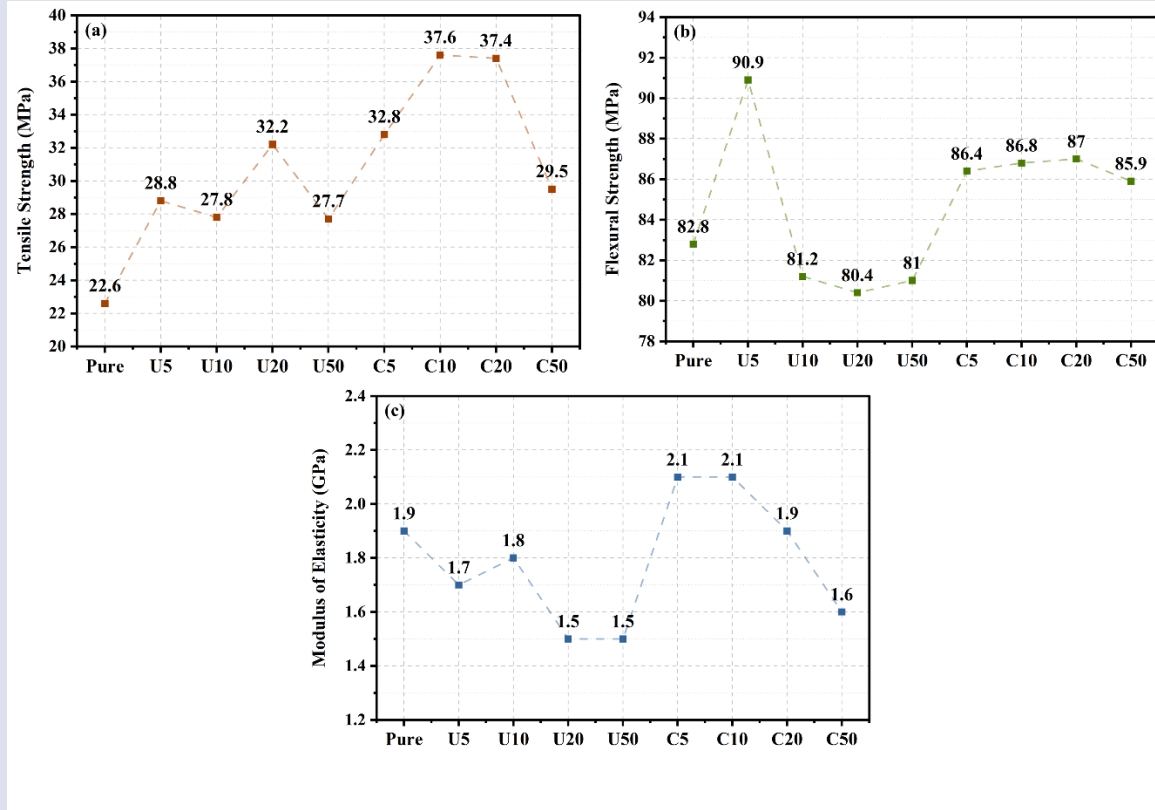


Figure 6. (a) Tensile strength, (b) flexural strength and (c) modulus of elasticity of pure and composite samples.

Table 3. Detailed tensile strength, flexural strength and modulus of elasticity values of pure and composite samples.

Name	Tensile Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
Pure	22.6 ± 0.34	82.8 ± 0.69	1.9 ± 0.12
U5	28.8 ± 0.29	90.9 ± 0.42	1.7 ± 0.11
U10	27.8 ± 0.35	81.2 ± 0.45	1.8 ± 0.07
U20	32.2 ± 0.11	80.4 ± 0.4	1.5 ± 0.05
U50	27.7 ± 0.82	81 ± 0.34	1.5 ± 0.07
C5	32.8 ± 0.12	86.4 ± 0.18	2.1 ± 0.11
C10	37.6 ± 0.54	86.8 ± 0.26	2.1 ± 0.14
C20	37.4 ± 0.66	87 ± 0.69	1.9 ± 0.12
C50	29.5 ± 0.44	85.9 ± 0.18	1.6 ± 0.09

Conclusion

A comprehensive investigation has been conducted on the effect of silanization on SiO₂-reinforced epoxy composite materials, with notable success. The synthesis by the sol-gel method and silane coating of NPs have been successfully achieved. The composite resins, obtained by varying the NP-to-matrix ratio during the addition process, were printed using a 3D printer. The findings of the study indicated that the silane coating process applied to the added NPs had a positive effect on the mechanical properties and conversion degree. The study's potential for enhancement was identified as follows: by using various matrix materials and NPs. This is particularly relevant in the domains of tissue engineering and

dentistry, where the enhancement of mechanical properties and the conversion degree through silanization of reinforcement materials in composite resins can lead to significant improvements.

Acknowledgement

This study was financially supported by Dokuz Eylul University, Scientific Research Projects Coordinatorship with the project code 2021.KB.FEN.046.

References

- Aati, S., Akram, Z., Ngo, H., & Fawzy, A. S. (2021). Development of 3D printed resin reinforced with modified ZrO₂ nanoparticles for long-term provisional dental restorations. *Dental Materials*, 37(6), e360–e374. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.02.010>
- Al-Turaif, H. A. (2010). Effect of nano TiO₂ particle size on mechanical properties of cured epoxy resin. *Progress in Organic Coatings*, 69(3), 241–246. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.05.011>
- Bao, Y., Paunović, N., & Leroux, J.-C. (2022). Challenges and opportunities in 3D printing of biodegradable medical devices by emerging photopolymerization techniques. *Advanced Functional Materials*, 32(15), 2109864. <https://doi.org/10.1002/adfm.202109864>
- Barszczewska-Rybarek, I. M. (2012). Quantitative determination of degree of conversion in photocured poly(urethane-dimethacrylate)s by Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*, 123(3), 1604–1611. <https://doi.org/10.1002/app.34553>
- Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., ... He, Y. (2019). 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, 39, 661–687. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>
- da Silva, L. H., Feitosa, S. A., Valera, M. C., de Araujo, M. A. M., & Tango, R. N. (2012). Effect of the addition of silanated silica on the mechanical properties of microwave heat-cured acrylic resin. *Gerodontology*, 29(2), e1019–e1023. <https://doi.org/10.1111/j.1741-2358.2011.00604.x>
- Dubey, R. S., Rajesh, Y. B. R. D., & More, M. A. (2015). Synthesis and characterization of SiO₂ nanoparticles via sol-gel method for industrial applications. *Materials Today: Proceedings*, 2(4), 3575–3579. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.098>
- Gad, M. M. A., Abualsaud, R., Al-Thobity, A. M., Almaskin, D. F., Alzaher, Z. A., Abushowmi, T. H., ... Al-Harbi, F. A. (2020). Effect of SiO₂ nanoparticles addition on the flexural strength of repaired acrylic denture base. *European Journal of Dentistry*, 14(1), 19–23. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1701076>
- Horvath, J. (2014). A brief history of 3D printing. In *Mastering 3D printing* (pp. 3–10). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0025-4_1
- Huang, J., Fu, P., Li, W., Xiao, L., Chen, J., & Nie, X. (2022). Influence of crosslinking density on the mechanical and thermal properties of plant oil-based epoxy resin. *RSC Advances*, 12(36), 23048–23056. <https://doi.org/10.1039/D2RA04206A>
- Mohsen, N. M., & Craig, R. G. (1995). Effect of silanation of fillers on their dispersability by monomer systems. *Journal of Oral Rehabilitation*, 22(3), 183–189.
- Moncada, E., Quijada, R., & Retuert, J. (2007). Nanoparticles prepared by the sol-gel method and their use in the formation of nanocomposites with polypropylene. *Nanotechnology*, 18(33), 335606. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/33/335606>
- Mussatto, C. M. B., Oliveira, E. M. N., Subramani, K., Papaléo, R. M., & Mota, E. G. (2020). Effect of silica nanoparticles on mechanical properties of self-cured acrylic resin. *Journal of Nanoparticle Research*, 22(11). <https://doi.org/10.1007/s11051-020-05050-y>
- Bahremandi Tolou, N., Fathi, M. H., Monshi, A., Mortazavi, V. S., & Mohammadi, M. (2013). The effect of adding TiO₂ nanoparticles on dental amalgam properties. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 10(2), 46–56. <http://ijmse.iust.ac.ir/article-1-565-en.html>
- Neibloom, D., Bevan, M. A., & Frechette, J. (2020). Surfactant-stabilized spontaneous 3-(trimethoxysilyl) propyl methacrylate nanoemulsions. *Langmuir*, 36(1), 284–292. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03412>
- Nguyen, T. C., Nguyen, T. D., Vu, D. T., Dinh, D. P., Nguyen, A. H., Ly, T. N. L., ... Thai, H. (2020). Modification of titanium dioxide nanoparticles with 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate silane coupling agent. *Journal of Chemistry*, 2020, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/1381407>
- Pehlivan, N., & Karacaer, Ö. (2014). Diş hekimliğinde kullanılan kompozit rezinlerin güçlendirilmesi. *Acta Odontologica Turcica*, 31, 160–166. <https://doi.org/10.17214/aot.66166>
- Rezvani, M. B., Atai, M., Hamze, F., & Hajrezai, R. (2016). The effect of silica nanoparticles on the mechanical properties of fiber-reinforced composite resins. *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects*, 10(2), 112–117. <https://doi.org/10.15171/joddd.2016.018>
- Rong, Y., Chen, H. Z., Wu, G., & Wang, M. (2005). Preparation and characterization of titanium dioxide nanoparticle/polystyrene composites via radical polymerization. *Materials Chemistry and Physics*, 91(2–3), 370–374. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2004.11.042>
- Rossi Canuto de Menezes, B., da Graça Sampaio, A., Morais da Silva, D., Larissa do Amaral Montanheiro, T., Koga-Ito, C. Y., & Patrocínio Thim, G. (2021). AgVO₃ nanorods silanized with γ-MPS: An alternative for effective dispersion of AgVO₃ in dental acrylic resins improving the mechanical properties. *Applied Surface Science*, 543, 148830. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148830>
- Siddiquey, I. A., Ukaji, E., Furusawa, T., Sato, M., & Suzuki, N. (2007). The effects of organic surface treatment by methacryloxypropyltrimethoxysilane on the photostability of TiO₂. *Materials Chemistry and Physics*, 105(2–3), 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.04.017>
- Silva, A. L., Salvador, G. M. da S., Castro, S. V. F., Carvalho, N. M. F., & Munoz, R. A. A. (2021). A 3D printer guide for the development and application of electrochemical cells and devices. *Frontiers in Chemistry*, 9, 684256. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.684256>
- Sodagar, A., Bahador, A., Khalil, S., Saffar Shahroudi, A., & Zaman Kassaei, M. (2013). The effect of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles on flexural strength of poly(methyl methacrylate) acrylic resins. *Journal of Prosthodontic Research*, 57(1), 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2012.05.001>
- Tham, W. L., Chow, W. S., & Ishak, Z. A. M. (2010). The effect of 3-(trimethoxysilyl) propyl methacrylate on the mechanical, thermal, and morphological properties of poly(methyl methacrylate)/hydroxyapatite composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 118(1), 218–228. <https://doi.org/10.1002/app.32111>
- Varshney, S., Nigam, A., Pawar, S. J., & Mishra, N. (2022). Structural, optical, cytotoxic, and anti-microbial properties of amorphous silica nanoparticles synthesised via hybrid method for biomedical applications. *Materials Technology*, 37(10), 1504–1515. <https://doi.org/10.1080/10667857.2021.1959190>
- Zhang, J., & Xiao, P. (2018). 3D printing of photopolymers. *Polymer Chemistry*, 9(13), 1530–1540. <https://doi.org/10.1039/C8PY00157J>
- Zornoza-Indart, A., & López-Arce, P. (2015). Silica nanoparticles (SiO₂): Influence of relative humidity in stone consolidation. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.06.002>



Design and Economic Assessment of a Building-Integrated Photovoltaic System at the Faculty of Engineering, Sivas Cumhuriyet University

Esra Başpınar^{1,a}, Vekil Sarı^{2,b,*}

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 58140, Sivas, Türkiye

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 15/04/2025

Accepted: 03/06/2025

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

Electricity generation from solar energy through photovoltaic systems has attracted significant attention both globally and in Turkey, leading to the establishment of solar power plants for electricity production. In this study, the design, performance analysis, and economic evaluation of a rooftop solar power plant for the Faculty of Engineering building at Sivas Cumhuriyet University were conducted. The buildings suitable for the installation of solar power plants were examined, and studies were carried out on the appropriate roof area using PVsyst and Helioscope software. The results obtained were then compared. The proposed solar power plant was planned to meet the electricity demand of the Faculty of Engineering building at Sivas Cumhuriyet University. The number of PV modules was calculated as 624, with a total power generation capacity of 343 KWp. The total energy production of the plant in its first year was estimated to be 506.101 KWh. The production forecasts derived from Helioscope and PVsyst software were analyzed using current electricity prices and the Regulation on Unlicensed Electricity Generation in the Electricity Market. Based on 2025 market prices and a market analysis, the cost of the solar power plant installation was calculated to be \$122.480 + VAT, with annual operating expenses estimated at \$1.400. Assuming a lifespan of 25 years for the plant, the analyses and calculations indicated that the investment would pay off in 2 years and 7 months.

Keywords: Solar Power Plant, Renewable Energy, Economic Analysis, PVsyst, Helioscope.

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Çatıya Entegre Güneş Enerjisi Santrali Tasarımı ve Ekonomik Değerlendirmesi

Araştırma Makalesi

Süreç

Geliş: 15/04/2025

Kabul: 03/06/2025

ÖZ

Fotovoltaik sistemler aracılığıyla güneş enerjisinden elektrik üretimi hem dünyada hem de Türkiye'de büyük bir ilgi görmektedir ve güneşten elektrik üretimi yapılabilmesi için güneş enerji santralleri kurulmaktadır. Bu çalışmada Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binasına çatı tipi güneş enerji santralinin tasarımı, performans incelenmesi ve ekonomik analizi yapılmıştır. Güneş enerji santrali kurulacak binalar incelenmiş, uygun çatı alanına PVsyst ve Helioscope programları aracılığıyla çalışmalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kurulması düşünülen güneş enerji santrali Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binasının elektrik ihtiyacını karşılayabilecek şekilde planlanmıştır. PV modül sayısı 624 ve panellerin üreteceği güç 343 KWp olarak hesaplanmıştır. Santralin ilk yılda üreteceği toplam enerji miktarı 506.101 KWh'dır. Santralin Helioscope ve PVsyst programları kullanılarak elde edilen üretim öngörüler, güncel elektrik fiyatları ve Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği kullanılarak yapılmıştır. Tesis kurulumu için, 2025 yılı piyasa fiyatı göz önüne alındığında ve pazar araştırması yapıldığında güneş enerjisi santralinin maliyetinin 122.480 \$ + KDV olarak ve yıllık işletme giderlerinin de 1.400 \$ olduğu hesaplanmıştır. Kurulacak olan santralin ömrünün 25 sene olduğu varsayılmış, gerekli analizler ve hesaplamalar sonucunda 2 yıl 7 ayda amorti edebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerji Santrali, Yenilenebilir Enerji, Ekonomik Analiz, PVsyst, Helioscope.

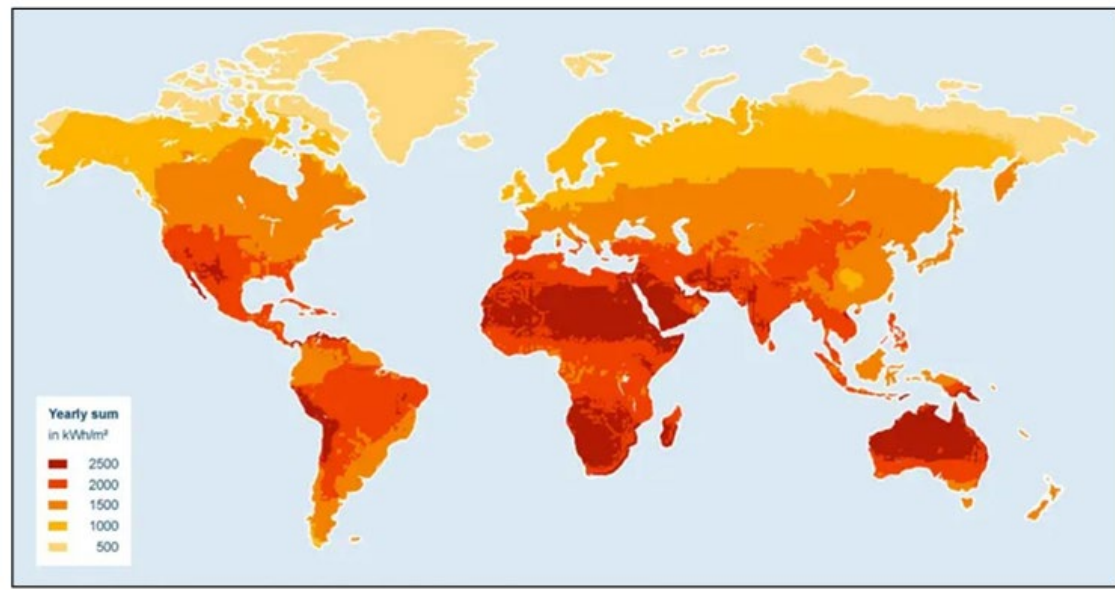
Giriş

Dünyada ve ülkemizde son yıllarda artan enerji tüketimi ile birlikte enerji üretiminde kullanılan kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil kaynakların azalması ve fiyatlarının artması nedeniyle yenilenebilir enerjiye olan talep artmıştır. Yenilenebilir enerji, güneş ve atmosferik olaylar var oldukça bitmeyecek enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir (Alkan, S. 2019). Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, jeotermal, rüzgâr, hidrolik ve dalga, biokütle olarak kabul edilmektedir, fakat tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının temelini güneş enerjisi oluşturur. Bu yüzden Dünyada enerji üretiminde kullanılabilecek olan en önemli enerji kaynağı güneştir. Şekil 1'de Dünya güneş enerjisi potansiyeli haritası görülmektedir.

Türkiye, kendi ülke sınırları içerisinde incelendiğinde Akdeniz bölgesi, İç Anadolu bölgesinin güney kesimi ve Güneydoğu Anadolu bölgesi fotovoltaiik sistemler için en

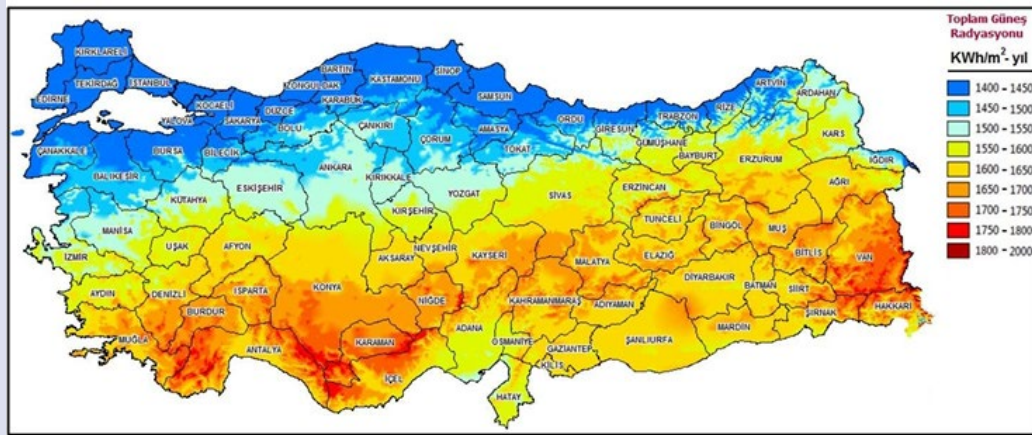
uygun bölgelerdir. Güneş enerji ortalamasının en düşük olduğu Karadeniz ve Marmara bölgelerinde dahi 1.400-1.500 KWh/m²-yıl değerlerinde güneş enerjisi potansiyeli olması Türkiye'nin güneş enerjisi alanındaki büyük potansiyelini gözler önüne sermektedir. Şekil 2'de bu dağılımı gösteren Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilmiştir (EİGM, 1999 (a)).

T.C. Enerji Bakanlığı verilerine göre, 2025 yılı Nisan ayı sonu itibarı ile Türkiye'nin kurulu gücü 118.668 MW'a ulaşmış olup toplam santral sayısı da 35.620'ye yükselmiştir. Mevcut santrallerin 768 adedi hidroelektrik, 332 adedi doğal gaz, 378 adedi rüzgâr, 66 adedi jeotermal, 71 adedi kömür, 33.545 adedi güneş, 460 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir. Kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; % 27,2'si hidrolik enerji, % 20,7'si doğal gaz, % 18,5'i kömür, % 11,2'si rüzgâr, % 18,7'si güneş, % 1,5'i jeotermal ve % 2,2'si ise diğer kaynaklar şeklindedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025). Şekil 3'de bu verilerin grafiği gösterilmiştir.



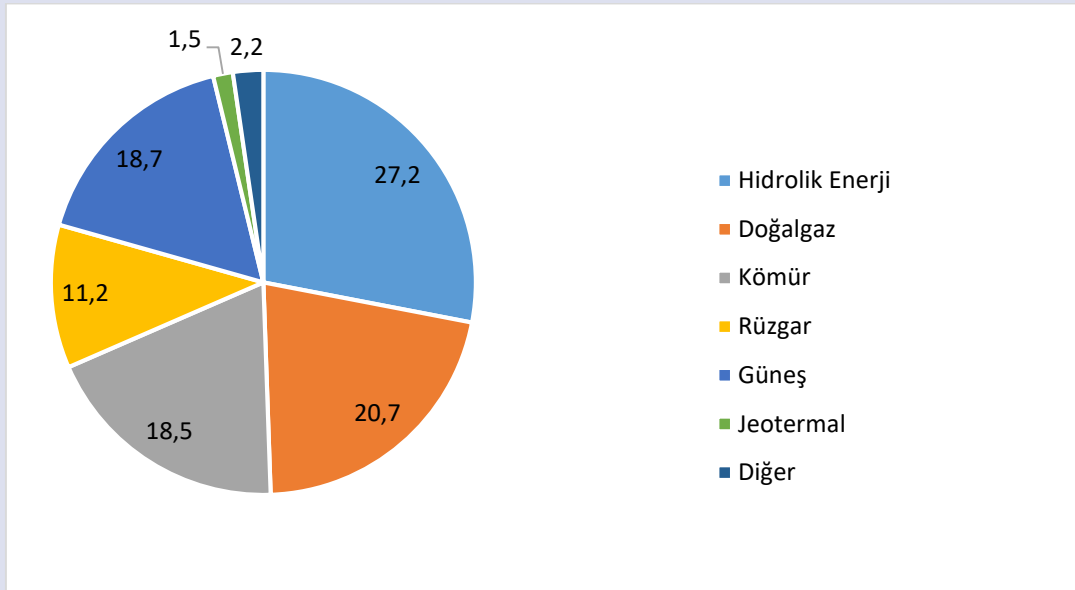
Şekil 1. Dünya güneş enerjisi potansiyeli haritası (Zientara, B. 2024)

Figure 1. World solar energy potential map



Şekil 2. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası (EİGM 1999 (a))

Figure 2. Türkiye solar energy potential map



Şekil 3. 2025 yılı Nisan ayı sonu itibarı ile kurulu güç dağılım grafiği
Figure 3. Installed power distribution chart as of the end of April 2025

Sivas İlinin Güneş Enerjisi Potansiyeli

Güneş enerji santrali kurulumu için önemli etkenlerden birisi kurulacağı yerin iklimsel verileridir. Sivas iline ait Meteonorm programından elde edilmiş iklimsel veriler Şekil 4-7'de gösterilmektedir.

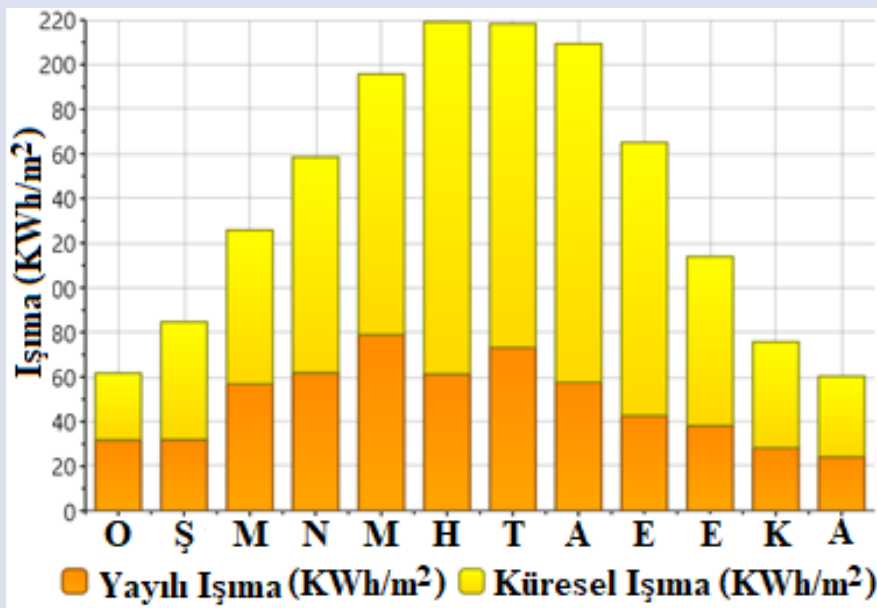
Şekil 4'de Sivas'a ait aylık güneş ışıma grafiği verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, en yüksek ışımanın Haziran ve Temmuz ayında, en düşük ışımanın ise Aralık ayında olduğu görülmektedir.

Şekil 5'de Sivas ili için aylık sıcaklık değerleri verilmiştir. Aylık sıcaklık değerleri incelendiğinde, en yüksek sıcaklığın 36 °C ile

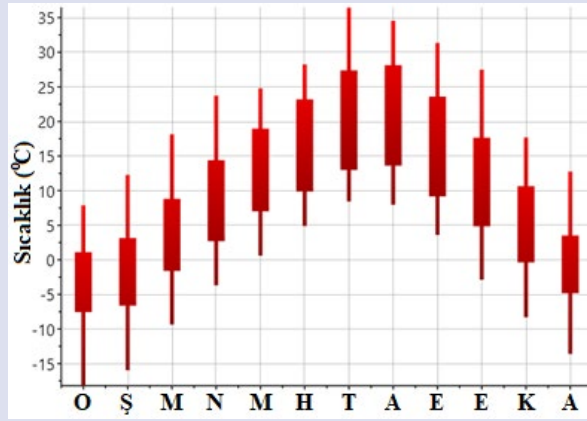
Temmuz ayında, en düşük sıcaklığın ise -18 °C ile Ocak ayında olduğu görülmektedir.

Şekil 6'da Sivas iline ait güneşlenme haritası verilmiştir. Bu haritaya göre Sivas'ın yıllık güneş radyasyonu ortalama 1.600 KWh/m² civarındadır.

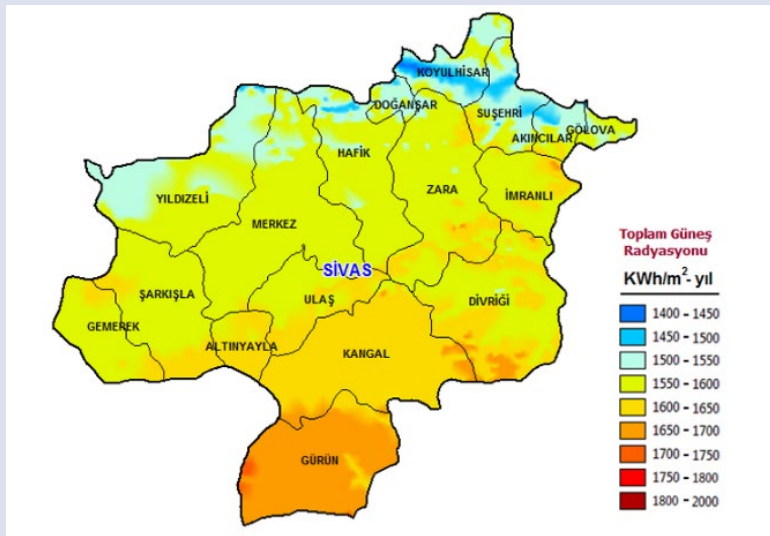
Şekil 7'de Sivas iline ait aylık yağış grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre en fazla yağış Nisan ve Mayıs aylarında olmaktadır (yaklaşık 60 mm civarında). En az yağış ise Temmuz ve Ağustos aylarında olmaktadır (yaklaşık 5 mm civarında).



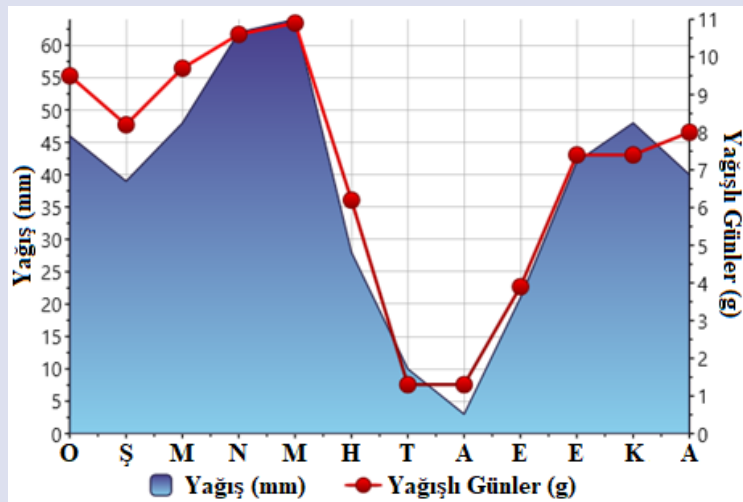
Şekil 4. Sivas/Merkez aylık güneş ışıma grafiği
Figure 4. Sivas/Central monthly solar radiation graph



Şekil 5. Sivas/Merkez aylık hava sıcaklığı grafiği
Figure 5. Sivas/Central monthly air temperature graph



Şekil 6. Sivas ili güneşlenme haritası (EİGM, 1999 (b))
Figure 6. Sivas province sunshine map



Şekil 7. Sivas/Merkez aylık yağış grafiği
Figure 7. Sivas/Central monthly precipitation chart

Fotovoltaik Teknolojisi

Fotovoltaik paneller güneş ışınlarının elektrik enerjisine dönüşmesini sağlar. Silisyum, bolca bulunan ve yarıiletken özellik gösteren bir element olduğu için fotovoltaik panel üretiminde en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Ancak saf halde mevcut olmadığından, çeşitli teknolojilerle saflaştırılarak kullanıma uygun hale getirilir. Bu süreçte kristal yapılarında farklılık gösterdiğinden, kristal silisyum özellikleri monokristal ve polikristal olarak sınıflandırılmıştır (Uçar, S. 2018).

Monokristal fotovoltaik hücrelerin materyal yapıları homojen özelliğe sahiptir ve bu sayede uzun bir süre performanslarını devam ettirebilirler. Ayrıca, yüksek verimlilik sunar ancak maliyetleri de yüksektir (Sekuçoğlu, S. A. 2012). Laboratuvar ortamında verimleri % 26 oranlarında olan bu hücrelerin ticari olanlarında ise verim % 18 üstüdür. Monokristal hücreler, büyütüldükten sonra 200 mikron kalınlığa inceltilecek monokristalin silisyum blokların tabakalar halinde bölünmesiyle üretilirler (Kılıç, U. 2018). Şekil 8’de polikristal ve monokristal hücre örneği görülmektedir.



Şekil 8. Polikristal ve monokristal hücre örneği (The Solar Future, 2017)
Figure 8. Example of polycrystalline and monocrystalline cells

Metot

Bu konuda yapılan daha önceki çalışmalarda PVsyst (Çolak, Ş. Ç. 2010, Girgin, M. H. 2011, Keskin, E. 2012, Küçükgoze, O. M. 2016, Çekirdek, M. 2017, Tekkale, G. 2018, Sarı, V. ve Özyiğit F. Y. 2020 (a), Sarı, V. ve Özyiğit F. Y. 2020 (b)), Helioscope (Ceylan, O. ve Taşdelen, K. 2018), Homer (Kahraman, M. Ü. 2018, Yücel, N. 2018), PV*SOL (Atay, S. 2020, Emre, Ö. 2023, Tunçez, H. O. 2022) gibi birçok program kullanılmıştır. Bu çalışmada ise GES kurulumu ve analizi için PVsyst ve Helioscope programları kullanılmıştır.

PVsyst programı İsviçre’nin Cenevre Üniversitesi tarafından geliştirilmiş kapsamlı bir fotovoltaik sistem simülasyon yazılımıdır. Şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler, fotovoltaik sulama sistemleri ve doğru akım şebekesi gibi fotovoltaik sistemlerin tasarımı ve performans analizinde kullanılır. Benzer programlara kıyasla daha detaylı programlamalar yapabildiği ve farklı kayıt işlemleri imkânı sunmasıyla öne çıkmaktadır (Aksangör, N. N. 2019).

PVsyst simülasyon yazılımı ile gerçekleştirilebilecek araştırmalar ve programın temel özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- Şebeke dışı fotovoltaik sistem tasarımı,
- Finansal hesaplamaların gerçekleştirilebilmesi,
- Fotovoltaik sistem bileşenlerinin özelliklerini içeren veri tabanı sayesinde pratik erişim,
- Şebeke içi fotovoltaik sistem tasarımı,
- Veri ve hesaplamaların CSV formatında aktarılabilmesi,

- PVGIS, NASA gibi kaynaklardan ışınlam verilerine erişim sağlanabilmesi,
- 3D simülasyon ile yakın gölgelerin analiz edilmesi ve modellenmesi,
- Meteonorm veri tabanından alınan iklim verilerine hızlı erişim (Haydaroğlu, C. 2017).

Helioscope programı güneş dizilerinin tasarımı ve mühendisliği basitleştirilmek için geliştirilmiştir. Helioscope programı, kapsamlı parametre seçenekleriyle simülasyon yaparak, güneş enerjisi santrali montajında hızlı tasarım olanağı sunar. Helioscope yazılımında fotovoltaik sistem tasarımı yaparken, adım adım; harita üzerinden enlem ve boylam belirleme, panellerin teknik özellikleri, toplam kapasite ve montaj bilgileri, invertör sayısı, özellikleri ve düzeni, sistem kurulumu için kablolarının uzunlukları ve kesit bilgileri, son olarak 3D görselleştirme aracılığıyla fotovoltaik bileşenlerin görselleştirilmesi yapılmaktadır. 5 MW'a kadar olan sistemler için simülasyon ve performans incelemesi yapılabilir. Helioscope yazılımında iklim veri kaynağı olarak NSRDB / NREL bağlantısı mevcuttur (Ceylan, O. ve Taşdelen, K. 2018).

Güneş Enerji Santralinin Konumu

Bu çalışmada Sivas ilinde bulunan Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binasının çatısına kurulacak güneş enerji santralinin tasarımı ve analizi yapılmıştır. Tasarlanan GES’in simülasyonu PVsyst ve Helioscope programları ile gerçekleştirilmiş ve ekonomik analizi yapılmıştır. Kurulacak güneş enerji santralinin koordinatları 39° 42' 22" N ve 37° 01' 46" E’dir. Şekil 9’da santralin kurulacağı yerin görüntüsü verilmiştir.

Tasarım

Sistem tasarımı için CW Enerji markasının ürettiği panel seçilmiştir. İnvertör olarak ise Huawei markasının ürettiği invertör seçilmiştir. Panelin ve invertörün özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir.

Kurulması planlanan santralde her biri 550 W gücünde 624 adet monokristal panel kullanılmış olup, Helioscope programındaki görünümü Şekil 10’da, PVsyst programındaki görünümü Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 9. GES’in kurulacağı konumun uydu görüntüsü

Figure 9. Satellite image of the location where the solar power plant will be installed

Tablo 1. Kullanılan güneş panelinin özellikleri (CW Enerji, 2024)

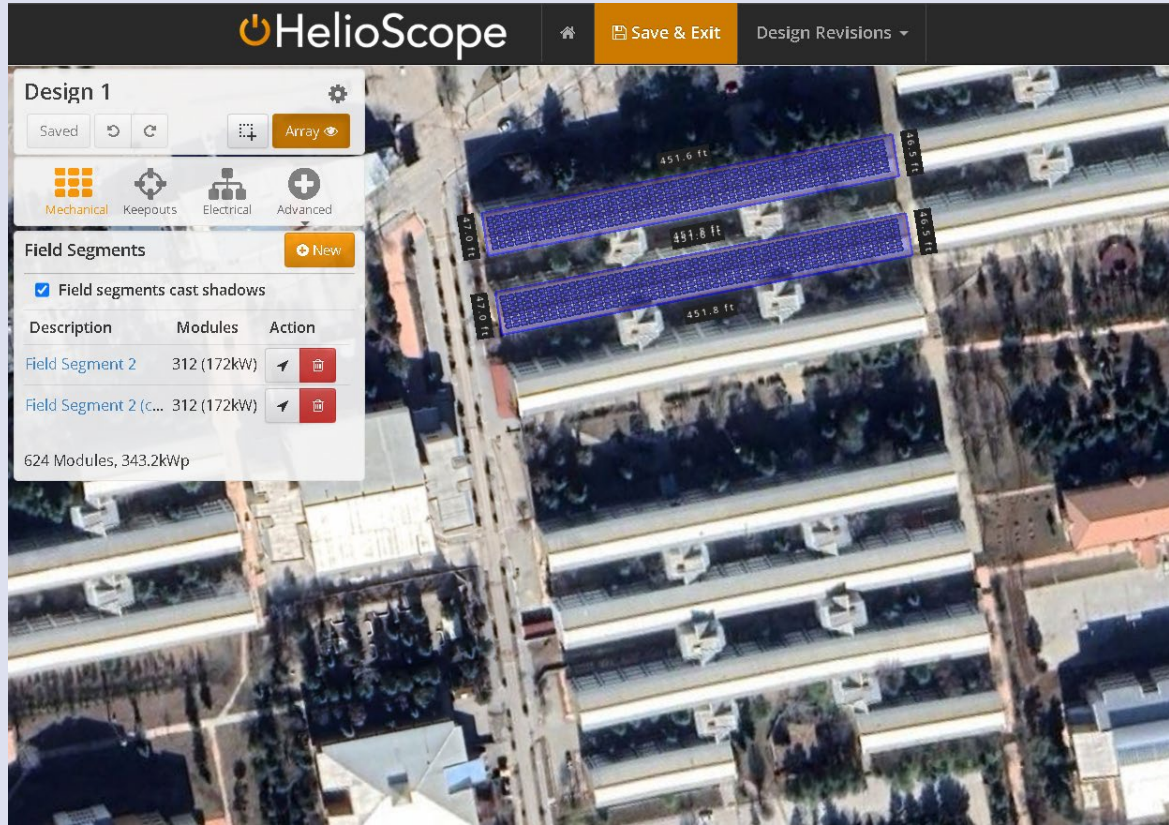
Table 1. Features of the solar panel used

Üretici	CW ENERJİ
Ürün	Monokristal FV modül
Model	CWT550W-108PM12
Kullanılan Adet	1.786
Verim	% 21,48
Çıkış Gücü	550 W
Çalışma Sıcaklığı	-40°C~, +85
Hücre Sayısı	144
Ürün Garantisi	12 yıl

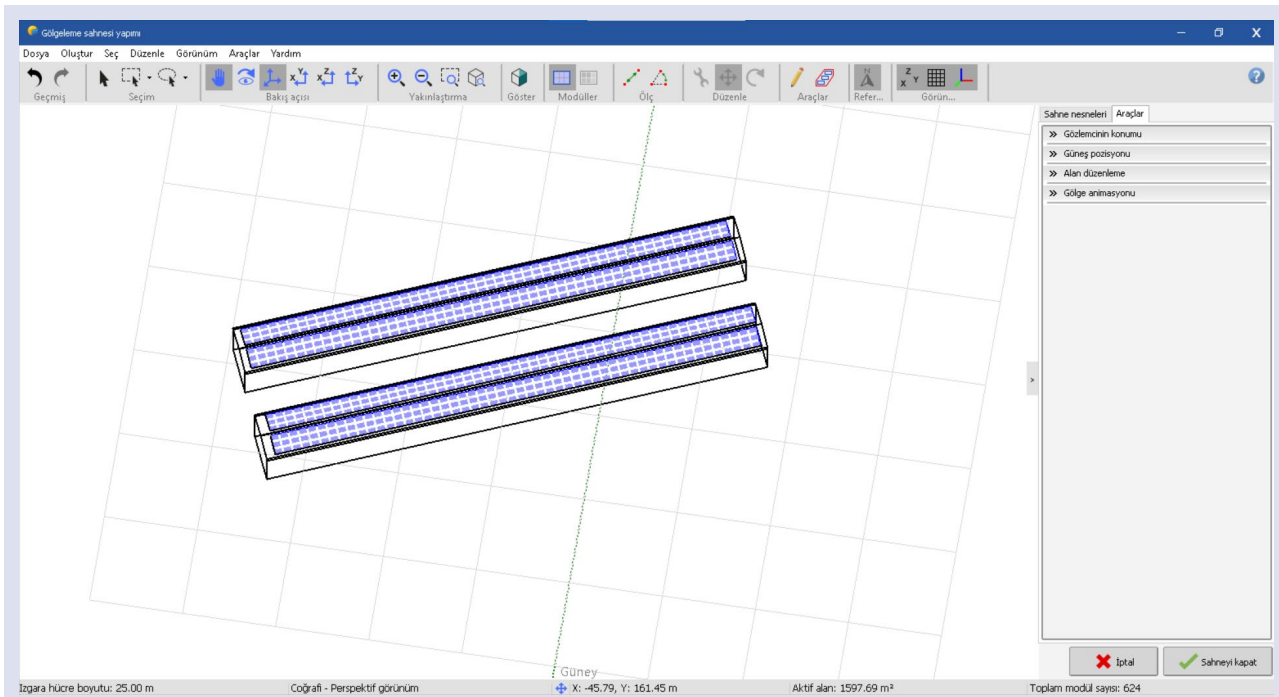
Tablo 2. Kullanılan invertörün özellikleri (Huawei, 2024)

Table 2. Features of the inverter used

Üretici	HUAWEI
Ürün	SUN2000-50KTL-M3
Mpp Aralığı	200-1000 V
Verim	% 98,5
Mpp Takipçi Sayısı	4
Ürün Garanti	10 yıl



Şekil 10. Kurulması düşünülen santralin Helioscope programındaki görünümü
 Figure 10. View of the proposed power plant in the Helioscope program



Şekil 11. Kurulması düşünülen santralin PVsyst programındaki görünümü
 Figure 11. View of the proposed power plant in the PVsyst program

Ekonomik Analiz

Tablo 3’de verilen 10.01.2025 tarihli Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankasının kur değerleri kullanılarak pazar araştırması yapılmış ve Tablo 4’de görülen santrale ait maliyet tablosu oluşturulmuştur.

Bu çalışmada ilgili abonelikte bağlantılı elektrik tüketimi, mevcut enerji sayaçları üzerinden ölçülmekte ve bu doğrultuda fatura işlemleri yapılmaktadır. Geçerli yönetmelik dahilinde, aylık tüketilen elektrik miktarı kadar satış yapılabilmektedir ve mahsuplaşma işlemi her ay

sonunda üretilen ve tüketilen enerji miktarlarının ölçülmesiyle aylık bazda gerçekleştirilmektedir (EPDK 2018). Bu doğrultuda, elde edilen veriler kullanılarak Tablo 5’de aylık bazda üretilen, tüketilen ve mahsuplaşılan elektrik enerjisi miktarı verilmiştir.

Ortaya çıkan mahsuplaşma işlemi ve yapılan maliyet analizleri sonucunda hesaplamalar yapılarak kurulacak olan santralin amortisman süresi 2 yıl 7 ay olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. ABD doları kur değeri

Table 3. Exchange rate

ABD Doları (\$) / TL
35,35

Tablo 4. Santralin maliyet tablosu

Table 4. Cost table of the power plant

Panel fiyatı	68.640 \$
İnvertör	9.000 \$
Kablolar AC-DC	18.000 \$
Etüt/Analiz	3.500 \$
İşçilik/Nakliye	5.500 \$
Konstrüksiyon	6.240 \$
Diğer	11.600 \$
Toplam Kurulum Maliyeti	122.480 \$
İşletme maliyeti(yıllık)	1.400 \$

Tablo 5. Üretilen, tüketilen ve mahsuplaşılan elektrik enerjisi

Table 5. Electrical energy produced, consumed and offset

Ay	İlk Yıl Üretilen Elektrik Enerjisi Miktarı (KWh)	2024 Yılında Tüketilen Elektrik Enerjisi Miktarı (KWh)	Mahsuplaşılan Elektrik Enerjisi Miktarı (KWh)
Ocak	19.351	29.621	-10.270
Şubat	26.532	27.572	-1.040
Mart	39.003	25.263	13.740
Nisan	48.546	20.213	20.213
Mayıs	58.208	19.937	19.937
Haziran	64.496	17.755	17.755
Temmuz	64.258	14.818	14.818
Ağustos	60.535	17.675	17.675
Eylül	49.301	17.590	17.590
Ekim	34.904	26.991	7.913
Kasım	22.907	27.881	-4.974
Aralık	18.328	32.605	-14.277
Toplam	506.101	277.921	99.080

Bulgular

Mühendislik fakültesi çatısı için tasarımı gerçekleştirilen fotovoltaik santralin enerji üretim kapasitesi, enerji kayıpları, aylık performans oranları PVsyst simülasyon programı kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 12’de santralin üretim ve performans verileri verilmiştir.

Dizi kayıpları, panellerin performansını etkileyen bir faktördür. İnverter kayıpları, DC enerjinin AC enerjiye

dönüştürülmesi sırasında oluşan enerji kaybı olarak ifade edilir. Kullanılan inverterlerin verimliliği arttıkça, sistemdeki toplam enerji kayıpları da o oranda azalır. Şekil 13’de yapılan çalışmanın PVsyst programında elde edilen kayıp diyagramı verilmiştir.

Şekil 13’de verilen PVsyst programında yapılan simülasyon sonucunda elde edilen diyagramdan da görüldüğü gibi sistem kurulumu için belirlenen bölgeye yatay düzlemde düşen yıllık global ışınım miktarı 1.713 KWh/m²’dir. Fotovoltaik paneller, monte edildikleri

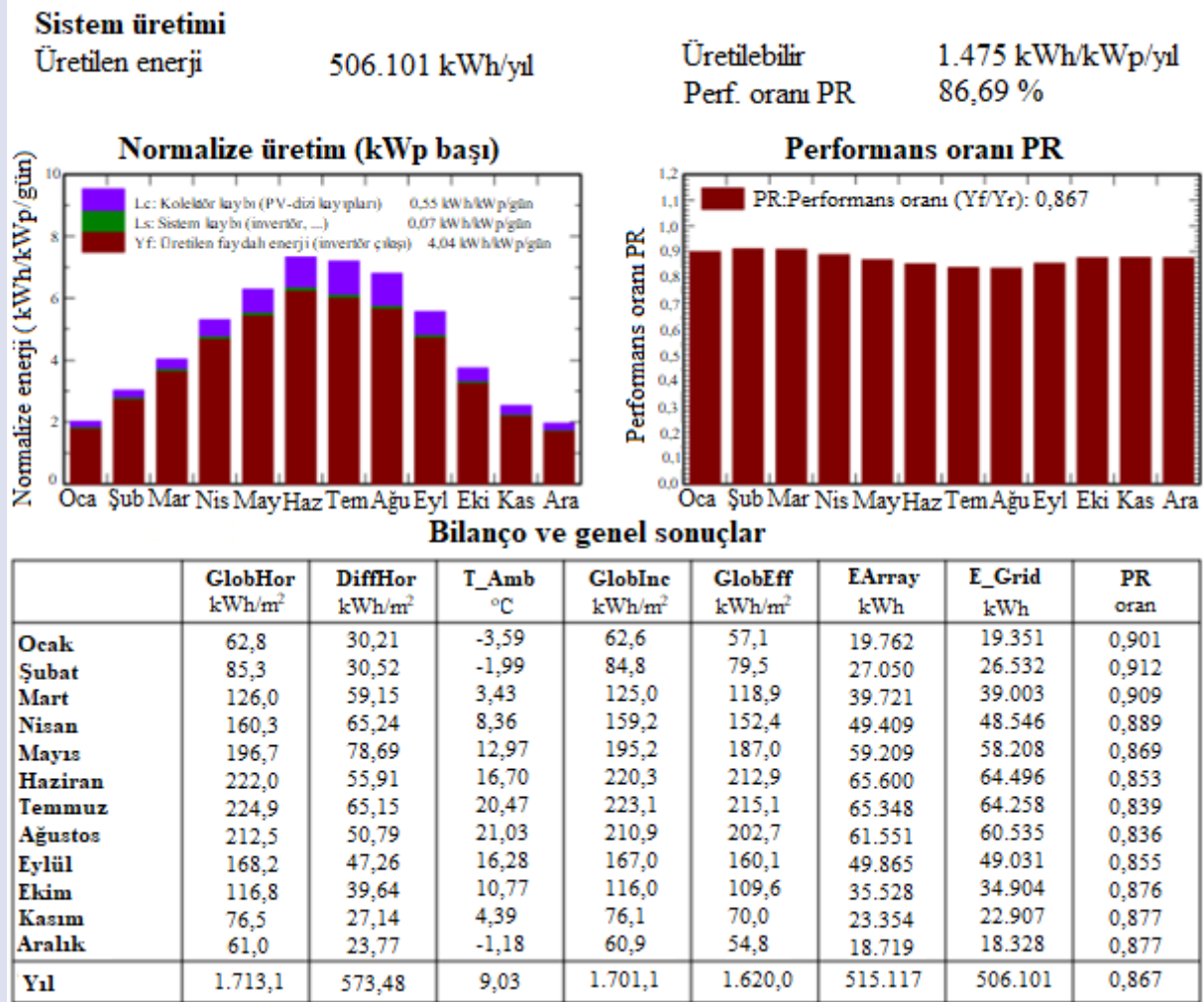
binanın çatı eğimi nedeniyle 10°'lik bir açıyla yerleştirilmiştir. Ancak, bu açı en uygun eğim olmadığından, panel yüzeyine ulaşan ışınlm miktarında % 0,7'lik bir azalma meydana gelmiştir.

Panelin yüzeyine düşen ışınlm, Güneş'ten geliş açısının her zaman dik olmaması nedeniyle bir kayıp yaşamaktadır ve toplam ışınlm kaybı % 3,5 olarak hesaplanmıştır. Optik kayıplar olarak adlandırılan bu kayıpların bir araya gelmesiyle, seçilen coğrafi konumda yatay düzleme düşen küresel ışınlmın % 5,50'si kaybolmuş ve panel yüzeyine ulaşan etkin ışınlm miktarı 1.620 KWh/m² olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan bu sistemde kullanılan panelin standart test koşulları altındaki verimi de % 21,48'dir ve panel dizisi nominal enerjisi 555.962 KWh olarak belirlenmiştir.

Panelin standart test koşulları altında çalıştığı göz önüne alındığında, düşük ışıma seviyelerinden

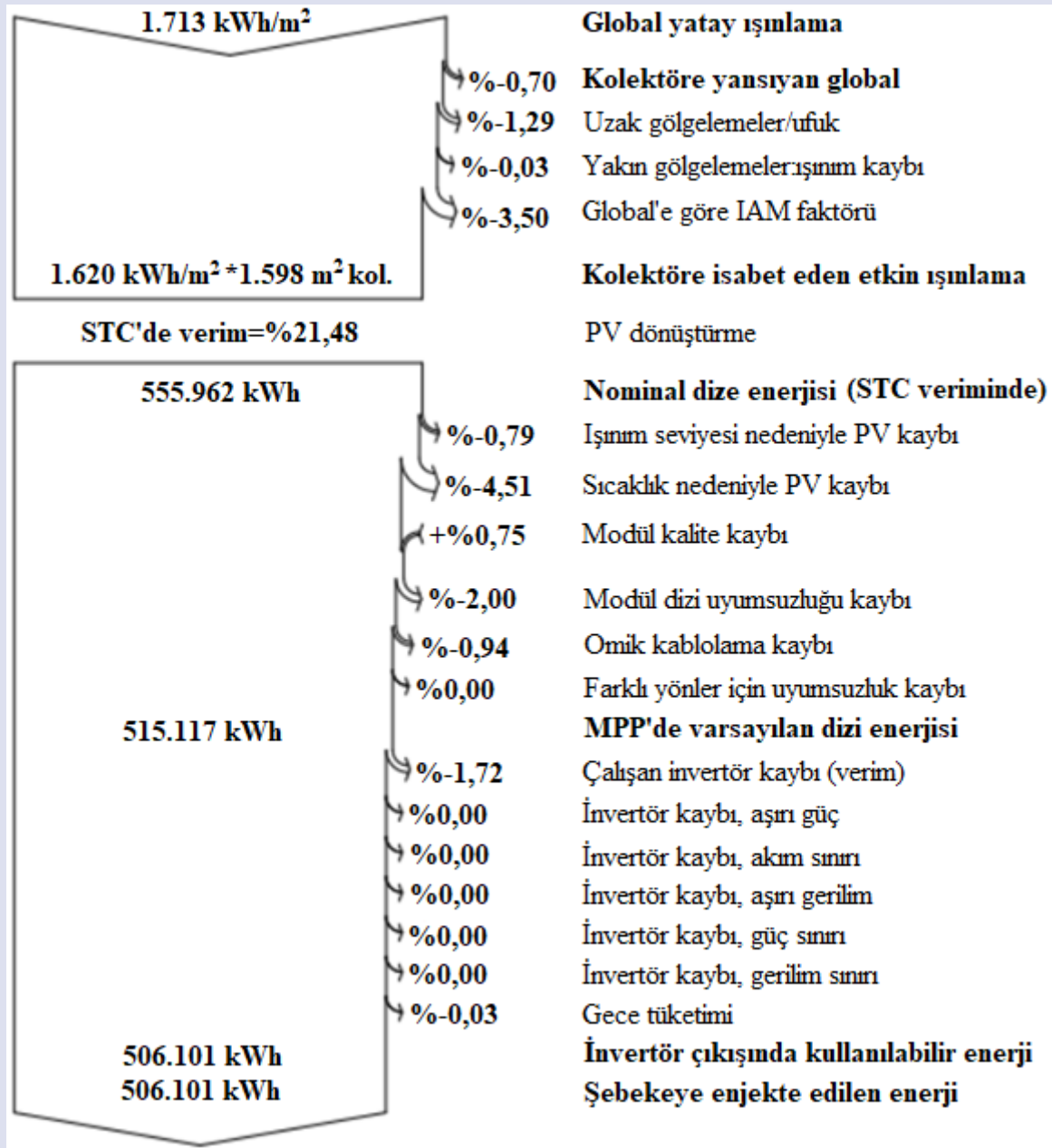
kaynaklanan kayıp % 0,79, sıcaklık etkisinden kaynaklanan kayıplar ise % 4,51 olarak hesaplanmıştır. Diziyi oluşturan her bir panelin dizideki konumu ve panellerin birbirine bağlanmasından kaynaklanan elektriksel kayıplar % 2'dir. Omik kayıplar % 0,94 olarak hesaplanırken, toplamda % 8,24'lük dizi kayıpları sonucunda MPP (maksimum güç noktası) seviyesinde dizi çıkışındaki enerji miktarı 515.117 KWh olarak hesaplanmıştır.

Evirici ve şebeke bağlantılarından kaynaklanan kayıplar, sistem kayıpları olarak kabul edilmiştir. Eviriciden kaynaklanan kayıp % 1,72 olup evirici çıkışındaki kullanılabilir enerji 506.101 KWh olarak hesaplanmıştır. Tüm bu kayıplar ve fotovoltaik panel verimi dikkate alındığında, simülasyonu yapılan şebeke bağlantılı sistemin yılda şebekeye 506.101 KWh enerji aktarabileceği hesaplanmıştır.



Şekil 12. Santrale ait üretim ve performans verileri

Figure 12. Production and performance data of the power plant



Şekil 13. PVsyst programından alınan kayıp diyagramı

Figure 13. Loss diagram from PVsyst program

Sonuç

Bu çalışmada, PVsyst ve Helioscope programları kullanılarak Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binası çatısına güneş enerjisi santrali tasarımı, analizi ve fizibilitesi yapılmıştır. Bu uygulamalar aracılığıyla tasarlanan bir sistemin yıllık enerji üretim miktarı ve performans oranı belirlenmiştir. Ayrıca, Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nin aylık elektrik tüketim verileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yerleşkenin elektrik tüketim verileri dikkate alınarak, lisanssız olarak kurulması planlanan santral her iki programda da yapılan tasarımlarda 550 W'lık 624 adet panelden 343 KWp kapasiteli santral tasarlanmıştır. Bu kapasite, mühendislik fakültesinin ihtiyaç duyduğu

elektrik üretildikten sonra, tüketim fazlası enerjinin mahsuplaşma ile satılacak şekilde planlanmıştır. PVsyst programında üretilen güç miktarı 343 KWp olurken, sisteme aktarılan yıllık enerji miktarı 506.101 KWh olarak hesaplanmıştır ve sistemin performans verimi % 86'dır. Tesis kurulumu için, 2025 yılı piyasa fiyatı göz önüne alındığında güneş enerjisi santralının kurulum maliyetinin 122.480 \$ + KDV olacağı hesaplanmıştır. Yıllık işletme giderlerinin 1.400 \$ olduğu hesaplanmıştır. Kurulacak olan santralin ömrünün 25 sene olduğu varsayılmıştır. Gerekli analizler ve hesaplamalar sonucunda 2 yıl 7 ayda amorti edebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Arta kalan yıllarda elde edilen kazanç göz önüne alındığında, projenin ekonomik açıdan uygulanabilir olduğu düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından M-2025-883 Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynakça

- Aksangör, N. N. 2019. Ankara Şartlarında Bir Fotovoltaik Sistemin PVsyst Programı Yardımı ile Performans Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Alkan, S. 2019. Çatı Üzeri Doğu-Batı Yönelimli Optimizerli Güneş Enerji Santralini Pilot Uygulaması ve Güney Yönelimli Güneş Enerji Santraline Göre Üretim Değerlendirmesi ve Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Arel Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Atay, S. 2020. Çatı Tipi Güneş Panellerinin Verimini Etkileyen Çevresel Parametrelerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye.
- Ceylan, O., Taşdelen, K. 2018. Isparta İli için Fotovoltaik Programlarının Simülasyon Sonuçlarının Doğruluğunun İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018, 18(3), 895 – 903.
- CW Enerji. 550Wp 108PM M12 HC-MB Solar Panel. 2024. Şu adresten erişilebilir: <https://cw-enerji.com/en/product/cw-enerji-550wp-108pm-m12-hc-mb-solar-panel-831.html> [Erişim Tarihi 10 Nisan 2025].
- Çekirdek, M. 2017. Fotovoltaik Güç Santrallerinin Tekno-Ekonomik Analizi: Türkiye Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- Çolak, Ş.Ç. 2010. Fotovoltaik Paneller Yardımı ile Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretiminin Maliyet Analizi ve Gelecekteki Projeksiyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- EİGM 1999 (a). Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA). Şu adresten erişilebilir: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> [Erişim Tarihi 10 Nisan 2025].
- EİGM 1999 (b). Sivas ilinin güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA). Şu adresten erişilebilir: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/58.aspx> [Erişim Tarihi 10 Nisan 2025].
- Emre, Ö. 2023. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
- EPDK. 2018. Elektrik Piyasasında Tüketim Tesisi ile Aynı Ölçüm Noktasından Bağlı ve Güneş Enerjisine Dayalı Üretim Tesisleri İçin Lisanssız Üretim Başvurularına ve İhtiyaç Fazlası Enerjinin Değerlendirilmesine İlişkin Usul ve Esaslar. Resmi Gazete. 18.01.2018.
- Girgin, M.H. 2011. Bir Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralini Fizibilitesi, Karaman Bölgesinde 5 MW'lık Güneş Enerjisi Santrali için Enerji Üretim Değerlendirmesi ve Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Haydaroglu, C. 2017. Dicle Üniversitesi Güneş Enerjisi Santralini Performans Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye.
- Huawei, 2024. SUN2000-50KTL-M3. Şu adresten erişilebilir: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100265241/dbf82720/technical-specifications> [Erişim Tarihi 10 Nisan 2025].
- Kahraman, M.Ü. 2018. Kütahya Bölgesi Güneş ve Rüzgâr Enerji Potansiyellerinin Tekno-Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye.
- Keskin, E. 2012. Türkiye İklim Koşullarında Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Tasarımı ve Maliyet Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Kılıç, U. 2018. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Enerji Üretim Sistemlerinin Tasarlanması ve Türkiye'de Farklı Coğrafik Bölgelerdeki Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Küçüköze, O. M. 2016. Erzincan İlinde Güneş Enerjili Elektrik Üretim Sisteminin Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan Üniversitesi, Erzincan, Türkiye.
- Sarı, V., Özyiğit, F. Y. 2020 (a). Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Yerleşkesinde Güneş Enerjisi Santralini Ekonomik Analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 22(65), 517-526.
- Sarı, V., Özyiğit, F. Y. 2020 (b). Sivas İlinin Farklı İlçelerinde Şebeke Bağlantılı Güneş Enerji Santrallerinin Tasarımı ve Analizi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 20, 425-437.
- Sekuçoğlu, S. A. 2012. Fotovoltaik (PV), Rüzgâr ve Hibrit Sistemlerin Tasarımı ve Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2025). Türkiye'nin kurulu gücü. Şu adresten erişilebilir: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> [Erişim Tarihi 22 Mayıs 2025].
- Tekkale, G. 2018. Türkiye'nin Çeşitli İllerinde Yapılacak Arazi Tipi Lisanssız Güneş Enerjisi Santrali Yatırımlarının Teknik ve Finansal Analizi Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- The Solar Future. 2017. How exactly do solar panels work? Şu adresten erişilebilir: <https://www.thesolarfuture.co.za/2017/12/03/exactly-solar-panels-work> [Erişim Tarihi 10 Nisan 2025].
- Tunçez H.O. 2022. Çatı Üstü Güneş Enerji Santrallerinde Verimliliği Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye.
- Uçar, S. 2018. Çatı ve Cephelerde Fotovoltaik Panel Uygulamaları Üzerine Bir Çalışma: Burdur Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Arel Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Yücel, N. 2018. Minimum Tasarım ve İşletme Maliyetli Fotovoltaik Sistemin Çatı Üstü Uygulaması: Denizli Teknobil Lisesi Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye.
- Zientara, B. 2024. Countries That Use the Most Solar Energy in 2024. Şu adresten erişilebilir: <https://www.solarreviews.com/blog/where-is-solar-power-used-the-most> [Erişim Tarihi 10 Nisan 2025].



Evaluation of Some Process Parameters with Combustible Recovery and Ash Content in Flotation Beneficiation of Lignite Coal

Özlem Kaya^{1,a,*}, Şaban Özütürker^{2,b}

¹ Sivas Cumhuriyet University, Engineering Faculty, Metallurgical and Materials Engineering Department, 58140 Sivas, Türkiye

² Sivas Cumhuriyet University, Engineering Faculty, Mining Engineering Department, 58140 Sivas, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 14/05/2025

Accepted: 19/06/2025

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

In this study, the effects of some basic process parameters on ash content and combustible recovery in the beneficiation of Yozgat/Sorgun lignite coal by flotation method were investigated. In the experimental studies, the parameters of pulp pH (2, 3, 5, 7, 9 and 12), solid ratio (10%, 15% and 20%), flotation time (2, 4, 5 and 6 minutes) and coal particle size (-75 µm, -125 µm, -250 µm and -500 µm) were optimized. According to the experimental results, the optimum flotation conditions were determined as pulp pH 7, 15% solid ratio, 5 minutes flotation time and coal particle size of -500 µm. Under these conditions, the ash content of the coal was reduced from 38.7% to 34.8% and the combustible recovery was obtained as 63.9%. In addition, the calorific value of the lignite coal was increased from 3563 kcal/kg to 4144 kcal/kg. The results obtained show that it is possible to enrich low quality lignite coal by flotation and that the choice of process parameters has a significant effect on product quality and recovery.

Keywords: Lignite coal, flotation, process parameters, ash content, combustible recovery

Linyit Kömürünün Flotasyon ile Zenginleştirilmesinde Bazı Proses Parametrelerinin Yanabilir Verim ve Kül İçeriği ile Değerlendirilmesi

Araştırma Makalesi

Süreç

Geliş: 14/05/2025

Kabul: 19/06/2025

ÖZ

Bu çalışmada, Yozgat/Sorgun linyit kömürünün flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesinde etkili olan bazı temel proses parametrelerinin kül içeriği ve yanabilir verim üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda; pülp pH'sı (2, 3, 5, 7, 9 ve 12), katı oranı (%10, %15 ve %20), flotasyon süresi (2, 4, 5 ve 6 dakika) ve kömür tane boyutu (-75 µm, -125 µm, -250 µm ve -500 µm) parametreleri optimize edilmiştir. Deney sonuçlarına göre optimum flotasyon koşulları; pülp pH'sı 7, katı oranı %15, flotasyon süresi 5 dakika ve kömür tane boyutu -500 µm olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda kömürün kül içeriği %38.7'den %34.8'e düşürülmüş ve yanabilir verim %63.9 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, linyit kömürünün kalorifik değeri 3563 kcal/kg'dan 4144 kcal/kg'a yükseltilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşük kaliteli linyit kömürünün flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesinin mümkün olduğunu ve proses parametrelerinin seçiminin ürün kalitesi ve verim üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Linyit kömürü, flotasyon, proses parametreleri, kül içeriği, yanabilir verim

Giriş

Kömür, ASTM (American Society for Testing and Materials) (1991) standartına göre; antrasit, bitümlü kömür (taş kömürü), alt bitümlü kömür ve linyit olmak üzere dört ana sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflandırmada linyit; kahverengi rengi, düşük kalorifik değeri (3800-4100 kcal/kg), yüksek nem içeriği (%25-65), yüksek kül içeriği (%5-45) ve yüksek uçucu madde oranı (%53-63) ile tanımlanan en düşük dereceli kömür türüdür (Ateşok, 2009; Cheng et al., 2020; Yu et al., 2013). Bu özellikler, linyitin doğrudan kullanımını hem ekonomik hem de çevresel açıdan verimsiz hale getirmektedir. Flotasyon yöntemi ile linyitin kül içeriğini düşürerek elde edilen ürünün kalorifik değerini yükseltmek mümkün olmaktadır.

Flotasyon, son 50 yıldır ince boyutlu kömürlerin (-500 µm) zenginleştirilmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, kömür ve gang mineralleri arasındaki yüzey özellikleri farkına dayanarak uygulanmaktadır. Kömür, doğal olarak hidrofobik özellikte olduğundan flotasyon ile zenginleştirilmesi genellikle kolaydır. Ancak, değişik kömür türleri farklı flotasyon özellikleri göstermektedir. Linyit gibi düşük dereceli kömürlerde, kömür yüzeyinde bulunan hidroksil (-OH), karbonil (C=O) ve karboksil (-COOH) gibi oksijenli fonksiyonel gruplar, kömürün hidrofobikliğini azaltmakta ve flotasyon verimini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle linyit, flotasyonla zenginleştirilmesi en zor olan kömür türü olarak kabul edilmektedir (Xu et al., 2023; Wang et al., 2025).

Flotasyon, birçok faktörden etkilenen karmaşık bir zenginleştirme işlemidir. Bu faktörler; malzeme özellikleri, proses koşulları, kimyasal parametreler ve ekipman tasarım parametreleri olmak üzere dört ana başlıkta sınıflandırılabilir. Kömürün mineralojik ve petrografik yapısı, kömürleşme derecesi, oksidasyon derecesi ve tane boyutu gibi malzeme özellikleri; flotasyon seçiciliği ve verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir. Etkin bir partikül-kabarık çarpışması ve bağlanmasının sağlanabilmesi için pülp pH'sı, pülp yoğunluğu, sıcaklık, karıştırma hızı ve flotasyon süresi gibi proses parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bastırıcı, toplayıcı ve köpürtücü reaktiflerin türü ve miktarı gibi kimyasal parametreler ise kömür tanelerinin hidrofobikliği ve ile köpük fazının stabilitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Flotasyon hücresinin tipi ve tasarımı, karıştırma sistemi ve hava dağıtma mekanizması gibi ekipman parametreleri ise flotasyon hücresi içindeki hidrodinamik davranışı belirleyerek proses performansını doğrudan etkilemektedir (Polat et al., 2003).

Bu çalışmada, Yozgat/Sorgun linyit kömürünün flotasyon ile zenginleştirilmesinde bazı proses parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Pülp pH'sı, katı oranı, flotasyon süresi ve kömür tane boyutu değişkenleri incelenmiştir. Deney sonuçları, temiz kömürün kül içeriği (%) ve yanabilir verim (%) ile birlikte değerlendirilmiştir.

Malzeme ve Yöntem

Malzeme

Bu çalışmada Yozgat/Sorgun bölgesinden temin edilen bir linyit kömürü numunesi kullanılmıştır. Numunenin kısa analizi ASTM D3172-13 (2021) standartına göre gerçekleştirilmiş olup, %6.6 nem ve %38.7 kül içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Numunenin kalorifik değeri ise 3563 kcal/kg olarak tespit edilmiştir.

Flotasyon deneylerinde; bastırıcı olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3), toplayıcı olarak gazyağı ve köpürtücü olarak metil izobütil karbinol (MIBC) kullanılmıştır.

Yöntem

Flotasyon deneyleri, 1.2 L kapasiteli laboratuvar tipi Denver flotasyon makinası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kömür + su karışımı, tam ıslanmanın sağlanması amacıyla 1100 dev/dk. hızında 5 dakika süreyle karıştırılmıştır. Deneylerde, Özütürker (2019) tarafından Yozgat/Sorgun linyit kömürünün flotasyonunda bastırıcı, toplayıcı ve köpürtücü reaktiflerin miktarlarının incelenmesi sonucunda belirlenen optimum reaktif miktarları kullanılmıştır. Bu kapsamda; bastırıcı reaktif olarak 750 g/t sodyum silikat (Na_2SiO_3), toplayıcı reaktif olarak 750 g/t gazyağı ve köpürtücü reaktif olarak 500 g/t metil izobütil karbinol (MIBC) kullanılmıştır. Reaktiflerin kömür taneleri ile etkin biçimde etkileşebilmesi için, her bir reaktif ilave edildikten sonra sistem 5 dakika süreyle karıştırılmıştır. Reaktiflerin eklenmesini takiben sisteme hava verilmiş ve oluşan köpük fazı toplanarak flotasyon işlemi tamamlanmıştır. İşlem sonunda, yüzen ürün (konsantre) ve batan ürün (artık) filtrelenerek susuzlandırılmıştır. Konsantre ürünler, 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutulmuştur. Kurutulan ürünlerin (konsantreler) kül analizleri, ASTM D3174-12 (2020) standartına göre gerçekleştirilmiştir.

Flotasyon performansının değerlendirilmesinde, yanabilir verim (%) ve kül içeriği (%) hesaplamalarında aşağıdaki denklemler kullanılmıştır:

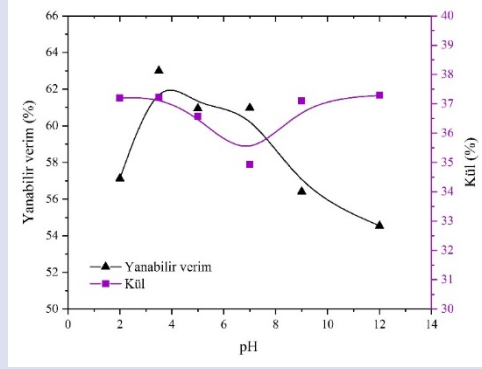
$$\text{Yanabilir verim (\%)} = \left(\frac{\text{Temiz kömür ağırlığı (g)}}{\text{Beslenen kömür ağırlığı (g)}} \right) \times \left(\frac{100 - \text{Temiz kömür külü (\%)}}{100 - \text{Beslenen kömür külü (\%)}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Kül (\%)} = \frac{\text{Kül analizi sonrası kalan artığın ağırlığı (g)}}{\text{Beslenen kömür ağırlığı (g)}} \times 100 \quad (2)$$

Bulgular ve Tartışma

Pülp pH'sının yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi

Flotasyonda pülp pH'sı, kömür ve gang minerallerinin yüzey yüklerini ve toplayıcıların adsorpsiyon davranışlarını değiştirerek flotasyon seçiciliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada, pülp pH'sının yanabilir verim (%) ve kül içeriği (%) üzerindeki etkisi 2-12 aralığında araştırılmıştır. Kullanılan kömür numunesinin doğal ortam pH değeri 3.0-3.5 aralığında ölçülmüştür. Elde edilen deney sonuçları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Pülp pH'sının flotasyon performansına etkisi
[Katı oranı: %10; flotasyon süresi: 5 dakika; kömür tane boyutu: -500 µm]

Şekil 1'de, düşük pH değerlerinde (özellikle pH: 2) yanabilir verimin düşük (%57.1) olduğu görülmektedir. Bu durum, pH: 2'de kömür yüzeyinde adsorbe edilen H^+ iyonu konsantrasyonunun artması ile yüzeyin pozitif yüklenmesi ve buna bağlı olarak kömürün hidrofobikliğinin azalması ile açıklanabilir. Birçok araştırmada, düşük ranklı ve oksitlenmiş kömürlerin izoelektrik noktalarına yakın pH aralıklarında yani pH: 3-5'de daha yüksek yüzeylilik gösterdiği belirtilmektedir (Molatlhegi and Alagha, 2016; Polat et al., 2003; Vamvuka and Agridiotis, 2001). Yapılan deneylerde kömür tanelerinin yüzey yükü, pH: 3 ve 4 değerlerinde izoelektrik noktasına yaklaşmış, bu da toplamı reaktiflerin kömür taneleri üzerindeki rekabetçi adsorpsiyonu azaltarak kömür-hava kabarcığı etkileşimini kolaylaştırmış ve dolayısıyla daha yüksek yüzeylilik ve yanıcı verim sağlamıştır. Yanabilir verim, pH: 7'de ise maksimum %61.0 olarak elde edilmiştir. Ancak, pH:7'den sonra, alkali ortama geçilmesiyle (pH: 9-12) yanabilir verimde belirgin bir düşüş gözlenmiş ve pH:12'de en düşük yanabilir verim %54.5 olarak elde edilmiştir. Bu düşüş, alkali pH koşullarında kömür tanelerinin yüzey yükünün daha negatifleşmesiyle, kömür taneleri ve hava kabarcıkları arasındaki elektrostatik itmenin artması, hidrofobikliğinin azalması ve dolayısıyla yüzeyliliğin düşmesiyle açıklanabilir (Molatlhegi and Alagha, 2016).

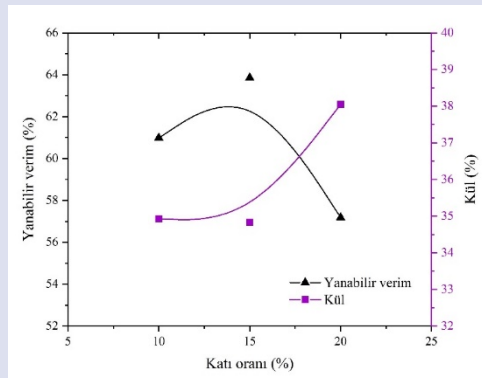
Benzer bir eğilim kül içeriği açısından da gözlenmiştir. Özellikle asidik koşullarda (pH: 2-5) kül içeriği yüksek

seviyelerdedir. Bu durum, asidik pH koşullarında gang minerallerinin (kil, silikat, pirit vb.) yüzeylerinin daha hidrofobik hale gelmesi ve kömür ile birlikte köpük fazında konsantreye taşınması ile açıklanabilir. Kül içeriği açısından en düşük değer, pH: 7'de %35.0 olarak elde edilmiştir. Öte yandan pH'nın alkali değerlere (pH: 9-12) yükselmesiyle birlikte kül içeriğinde yeniden bir artış meydana gelmiştir. Bu artış, alkali ortamda gang minerallerinin yüzeylerinin daha negatif hale gelerek hava kabarcıklarına tutunma eğilimlerinin artması ve köpük fazına taşınmaları ile açıklanabilir.

Deney sonuçları, pülp pH'sının flotasyon performansında önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Hem yanabilir verim hem de kül içeriği açısından değerlendirildiğinde, optimum koşulların nötr pH'da sağlandığını göstermektedir. pH:7'de en yüksek yanabilir verim (%61.0) ve en düşük kül içeriği (%35.0) elde edilmiştir. Bu nedenle, çalışmada optimum pülp pH'sı 7 olarak belirlenmiş ve diğer proses parametrelerinin etkisi incelenirken bu değer kullanılmıştır.

Katı oranının yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi

Flotasyonda katı oranının yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi %10, %15 ve %20 olmak üzere üç farklı katı oranlarında araştırılmıştır. Deney sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Katı oranının flotasyon performansına etkisi
[Pülp pH:7; flotasyon süresi: 5 dakika; kömür tane boyutu: -500 µm]

Şekil 2’de görüldüğü gibi, katı oranının artışı ile yanabilir verimde %15 katı oranına kadar artış eğilimi gözlenmiş, bu oranın üzerinde ise belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Düşük katı oranlarında (örneğin %10) sistemin seyreltik yapısından dolayı flotasyon reaktiflerinin kömür yüzeylerine yeterli düzeyde adsorplanmaması, kömür tanelerinin hava kabarcıkları ile etkileşimi sınırlanmakta ve bu durum yanabilir verimin düşük seviyelerde kalmasına neden olmaktadır. Buna karşılık, katı oranının %15’e yükseltilmesiyle, reaktiflerin kömür yüzeyine adsorpsiyonu ve hava kabarcıkları ile olan etkileşimi artmakta ve böylece verim maksimum düzeye ulaşmaktadır. Ancak, katı oranının aşırı yükseltilmesi (örneğin %20) ile çözelti viskozitesinin artması ve taneler arası çarpışmaların etkinliği azaltması nedeniyle reaktiflerin kömür taneleri ile temas süresi azalmakta, bu da tanecik-reaktif etkileşimini olumsuz etkileyerek yanabilir verimde düşüşe yol açmaktadır.

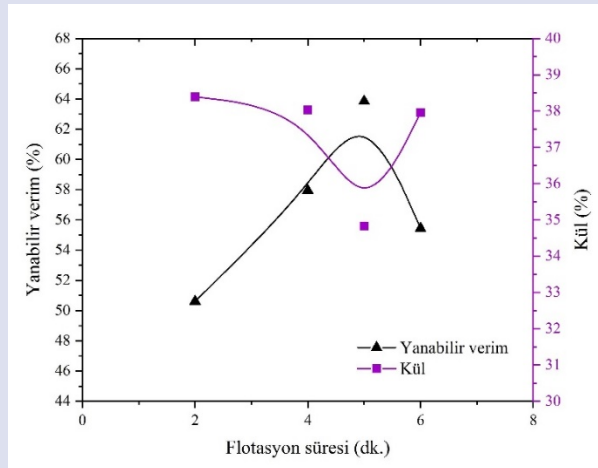
Kül içeriği açısından değerlendirildiğinde, katı oranı arttıkça kül değerlerinde belirgin bir yükselme eğilimi görülmektedir. Bu artış, özellikle ince taneli kül yapıcı gang

minerallerinin (örneğin kil ve silikat mineralleri) flotasyon sırasında köpük fazına taşınarak konsantrede birikmeleri ile açıklanabilir. Bu durum, yüksek katı oranlarında ayırma işleminin seçiciliğini olumsuz etkileyerek konsantrenin kül içeriğinin artmasına neden olmaktadır.

Kömürün özgül ağırlığının metalik cevherlere göre daha düşük olması nedeniyle, kömür flotasyonu genellikle düşük katı oranlarında gerçekleştirilir. Literatürde birçok araştırmacı, kömür flotasyonu için optimum katı oranının %12-15 aralığında olduğunu bildirmişlerdir (Ateşok, 2009; Kural, 1991). Bu çalışmada, %63.9 yanabilir verim ve %34.8 kül içeriği ile %15 katı oranı optimum olarak belirlenmiştir. Diğer proses parametrelerinin etkileri bu optimum katı oranında incelenmiştir.

Flotasyon süresinin yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi

Flotasyon süresinin yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi, farklı sürelerde (2, 4, 5 ve 6 dakika) incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçları Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Flotasyon süresinin flotasyon performansına etkisi
[Pülp pH: 7; katı oranı: %15; kömür tane boyutu: -500 µm]

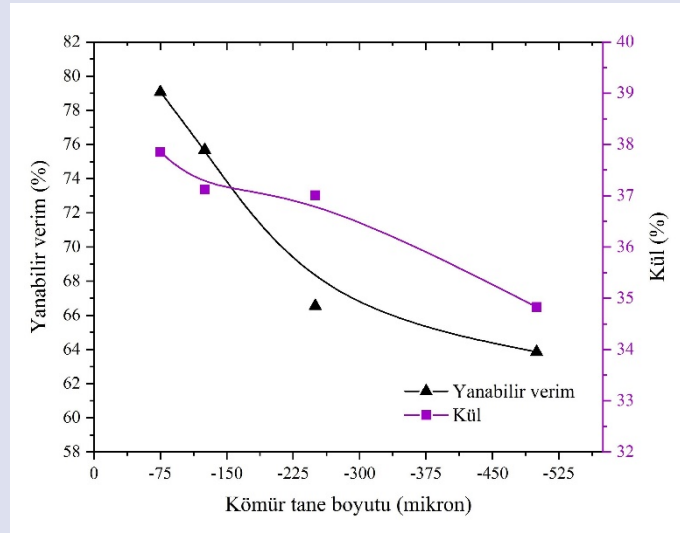
Şekil 3’de görüldüğü gibi, flotasyon süresinin artmasıyla birlikte yanabilir verim başlangıçta artış göstermiş ve 5 dakikada maksimum %63.9’luk yanabilir verim değeri elde edilmiştir. Ancak, flotasyon süresi 5 dakikanın üzerine çıktığında, yanabilir verim yeniden azalmaya başlamıştır. Benzer şekilde, kül içeriği 5 dakika flotasyon süresine kadar azalmakta, bu süreden sonra yeniden artış göstermektedir. Kısa flotasyon sürelerinde (2 ve 4 dakika), kömür taneleri ile flotasyon reaktifleri arasında temas süresinin yetersiz olması nedeniyle, hidrofobik kömür tanelerinin köpük fazına taşınması sınırlı kalmakta, dolayısıyla yanabilir verim düşük olmaktadır. Flotasyon süresi uzadıkça, kömürle birlikte ince taneli gang minerallerinin de köpük fazına sürüklenmesi işleminin seçiciliğini azaltmakta ve daha fazla kül oluşturan inorganik minerallerin konsantreye birikmesi ise kül

içeriğinin artmasına neden olmaktadır (Laskowski, 2001; Fuerstenau et al., 2007).

Deney sonuçları, optimum flotasyon süresinin 5 dakika olduğunu ve bu sürenin hem en yüksek yanabilir verim (%63.9) hem de en düşük kül içeriği (%34.8) sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, diğer proses parametresinin etkisinin incelenmesinde flotasyon süresi 5 dakika olarak belirlenmiştir.

Kömür tane boyutunun yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi

Kömür tane boyutunun yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi, -75 µm, -125 µm, -250 µm ve -500 µm olmak üzere dört farklı tane boyutunda araştırılmıştır. Deney sonuçları Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Kömür tane boyutunun flotasyon performansına etkisi
[Pülp pH:7; katı oranı: %15; flotasyon süresi: 5 dakika]

Şekil 4'de görüldüğü gibi, kömür tane boyutu küçüldükçe yanabilir verim değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle -500 μm tane boyutunda %63.9 olan yanabilir verim, -75 μm tane boyutunda %79.1'e yükselmiştir. Bu artış, ince tanelerin daha geniş yüzey alanına sahip olması ve flotasyon reaktifleri ile daha iyi etkileşime girmesi ile açıklanabilir (Laskowski, 2001). Benzer şekilde, kömür tane boyutu küçüldükçe kül içeriği de artmıştır. -500 μm tane boyutunda %34.8 kül içeriği, -75 μm tane boyutunda %37.9'a yükselmiştir. Bu durum, ince boyutlu kömür fraksiyonlarının daha yüksek oranda mineral madde (örneğin kil mineralleri, kuvars, pirit vb.) içermesi ve bu gang minerallerinin köpük fazına taşınarak konsantrenin kül içeriğini artırması ile açıklanabilir.

Deney sonuçlarına göre -500 μm kömür tane boyutu, yüksek yanabilir verim (%63.9) ve düşük kül içeriği (%34.8) sağladığı için optimum tane boyutu olarak seçilmiştir. Flotasyonda tane boyutu, prosesin seçiciliği ve verim üzerinde önemli etkiye sahip temel parametrelerden biridir (Bedekovic, 2016). Laskowski (2001), iri boyutlu kömür tanelerinin daha seçici flotasyon sağladığını ancak düşük yanabilir verim oranlarında yüzdüklerini; buna karşın daha ince boyutlu tanelerin ise yüksek verim ile çok iyi yüzdüklerini, ancak prosesin seçiciliğinin düşük olduğunu bildirmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmanın amacı, Yozgat/Sorgun linyit kömürünün flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesinde bazı proses parametrelerinin yanabilir verim ve kül içeriği üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesidir. İncelenen temel parametreler; pülp pH'sı, katı oranı, flotasyon süresi ve kömür tane boyutudur. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Pülp pH'sının etkisi değerlendirildiğinde, nötr ortam pH'sı 7'nin flotasyon için en uygun koşulları sağladığı

belirlenmiştir. Bu koşulda, %61.0 en yüksek yanabilir verim ve %35.0 en düşük kül içeriği elde edilmiştir.

- Katı oranının etkisi değerlendirildiğinde, %15 katı oranı optimum değer olarak belirlenmiştir.

- Flotasyon süresi açısından değerlendirildiğinde, en uygun sürenin 5 dakika olduğu belirlenmiştir. Bu sürede, %63.9 en yüksek yanabilir verim ve %34.8 en düşük kül içeriği elde edilmiştir.

- Kömür tane boyutu açısından değerlendirildiğinde, -500 μm tane boyutunun daha yüksek seçicilik ve verim sağladığı görülmüş ve bu nedenle optimum tane boyutu olarak seçilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, Yozgat/Sorgun linyit kömürünün flotasyon ile zenginleştirilmesinde optimum koşullar; pülp pH'sı 7, %15 katı oranı, 5 dakika flotasyon süresi ve -500 μm kömür tane boyutu olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda linyit kömürünün kül içeriği %38.7'den %34.8'e düşürülmüş ve %63.9 yanabilir verim değeri elde edilmiştir. Ayrıca, linyit kömürünün kalorifik değeri 3563 kcal/kg'dan 4144 kcal/kg'a yükseltiştir.

Kaynaklar

- ASTM. 1991. Annual book of ASTM standards. Part 26, Philadelphia.
- ASTM D3172-13. 2021. Standard practice for proximate analysis of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3174-12.2020. Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Ateşok G. 2009. Kömür hazırlama ve teknolojisi (Genişletilmiş 2. Baskı). İstanbul: Yurt Madencilik Geliştirme Vakfı Yayınları.
- Bedekovic G. 2016. A study of the effect of operating parameters in column flotation using experimental design. Physicochemical Problems of Minerals Processing. 52(2): 523-535. <https://doi.org/10.5277/ppmp160201>.
- Cheng G, Li Z, Cao Y and Jiang Z. 2020. Research progress in lignite flotation intensification. International Journal of Coal Preparation and Utilization. 40(1): 59-76. <https://doi.org/10.1080/19392699.2018.1541894>.

- Fuerstenau MC, Jameson GJ and Yoon RH. 2007. Froth flotation: A century of innovation. Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME).
- Kural O. 1991. Kömür. İstanbul, Turkey: Kurtiş Matbaası.
- Laskowski JS. 2001. Coal flotation and fine coal utilization. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science B.V.
- Molatlıhegi O and Alagha L. 2016. Ash depression in fine coal flotation using a novel polymer aid. International Journal of Clean Coal and Energy. 5(4): 65-85. <http://dx.doi.org/10.4236/ijcce.2016.54006>.
- Özütürker Ş. 2019. Kömürün flotasyon yöntemi ile zenginleştirilebilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
- Polat M, Polat H and Chander S. 2003. Physical and chemical interactions in coal flotation. International Journal of Mineral Processing. 72(1-4): 199-213. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00099-1](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00099-1).
- Vamvuka D and Agridiotis V. 2001. The effect of chemical reagents on lignite flotation. International Journal of Mineral Processing. 61(3). [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(00\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(00)00034-X).
- Wang X, Ding R, Cui X, Qin Y, Cheng G, Abaka-Wood G and Li E. 2025. New insights for improving low-rank coal flotation performance via tetrahydrofurfuryl ester collectors. Minerals. 15(1): 78. <https://doi.org/10.3390/min15010078>.
- Xu M, Zhou Y, Hao Y, Cao Y, Xing Y and Gui X. 2023. Enhancing flotation performance of low-rank coal using environment-friendly vegetable oil. Minerals. 13(6): 717. <https://doi.org/10.3390/min13060717>.
- Yu J, Tahmasebi A, Han Y, Yin F and Li X. 2013. A review on water in low rank coals: The existence, interaction with coal structure and effects on coal utilization. Fuel Processing Technology. 106: 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.051>.



Strain Effect and Artificial Intelligence Applications on Electronic Band Structure of MoS₂

Hamdi Dağıstanlı^{1,a,*}

¹ Konak Radikal Anatolian High School, İzmir, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 11/01/2025

Accepted: 24/02/2025

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

Ab initio density functional theory (DFT) calculations have been utilised to ascertain the band gap of the 2D layered material MoS₂ under uniaxial strain. This involves finding optimised lattice parameters and calculating the electronic band structure. It is also noted that by applying strains ranging from -15% to 15%, a wide range of band gaps can be obtained to study the behaviours of the semimetal and metal. The ensuing outcomes are then applied to the domain of machine learning. Initially, PR, which is polynomial regression, is a machine learning method that can be studied with numpy, sklearn and scipy modules, and ANN (artificial neural network) is the application with tensorflow module that is applied to the optimised semi-metallic and metallic structures. The application of the latter involves the Least Squares method. The implementation of Leaky Relu (LRelu) and Elu functions is instrumental in facilitating the deployment of ANN. The potential dataset is obtained by using Quantum Espresso, and the calculations are made by using the National Center for High Performance Computing of Turkey (UYBHM). The PR and ANN results are calculated using the existing data set. The primary objective of utilising PR and artificial neural networks is to facilitate the plotting of Valance Band Maximum (VBM) and Conduction Band Minimum (CBM) graphs in the vicinity of the Fermi level.

This study based on data which are already available and could therefore be considered to be data mining. on the electronic band structure for MoS₂.

Keywords: MoS₂, DFT, electronic structure, strain effect, artificial neural network, polynomial regression.



hamdi.dagistanli@gmail.com



0000-0002-9845-9156

How to Cite: Dağıstanlı H., (2025) Strain Effect and Artificial Intelligence Applications on Electronic Band Structure of MoS₂, *Journal of Science and Technology*, 4(1): 38-50

Introduction

Two-dimensional (2D) materials, particularly transition metal dichalcogenides (2D-TMDs), have attracted significant attention due to their remarkable electronic, optical, and mechanical properties. The chemical formula for these materials is typically MX₂, where M represents a transition metal (e.g., Mo, W, Ti, Zr, V, Nb, Pd, Pt) and X is a chalcogen (S, Se, Te) or oxygen (O). This diversity in their composition leads to a wide range of functionalities. Among the TMD family, molybdenum disulfide (MoS₂) has emerged as a benchmark material, celebrated for its semiconducting nature, high mechanical strength, and flexibility. Structurally, MoS₂ comprises layers of molybdenum atoms covalently bonded to sulfur atoms, forming a sandwich-like arrangement. These layers are held together by weak van der Waals forces, enabling straightforward exfoliation into monolayer or few-layer forms (Novoselov et al.(2004)).

MoS₂ exhibits a transition from an indirect bandgap of approximately 1.2 eV in its bulk form to a direct bandgap of around 1.8 eV when reduced to a monolayer. This property

renders it an exceptionally versatile material for a wide range of optoelectronic applications (Splendiani, A., et al.(2010)). The tunability of this bandgap, in conjunction with its high carrier mobility and strong light-matter interactions, has facilitated the integration of MoS₂ into various applications, including transistors, photodetectors, and energy storage devices (Wang, Q. H., et al. (2012)).

Beyond its applications in electronics, MoS₂ demonstrates remarkable catalytic activity for hydrogen evolution reactions (HER), a critical process in renewable energy technologies (Chhowalla, M., et al. (2013)). Its unique two-dimensional (2D) structure and inherent defects significantly enhance its catalytic performance. Moreover, its mechanical durability and chemical stability position it as an excellent candidate for wearable electronics and flexible devices (Bertolazzi, S., Brivio, J. & Kis, A. (2011)).

Advances in scalable synthesis techniques, such as liquid-phase exfoliation, have led to significant expansion in the practical utility of MoS₂ (Zhan, Y., et al. (2012)). However, challenges persist, including the need for precise control of

defect density, the achievement of uniform synthesis, and the deepening of understanding of interfacial properties. These challenges continue to drive research in this field.

In the section of this article devoted to artificial intelligence, the focus is not on solving equations representing physical problems. This study can be regarded as a data mining effort focused on the electronic properties of MoS₂. The dataset is utilised as training data for electronic band calculations of MoS₂, encompassing its semiconductor, semi-metallic, and metallic behaviours. These calculations are performed using Quantum Espresso (Giannozzi, P., et al. (2009), Giannozzi, P., et al. (2020)) and National Center for High Performance Computing of Turkey (UYBHM).

The Polynomial Regression (PR) algorithm is predicted on the least squares method in order to establish a regression relationship fitted to dataset. In this study, the PR algorithm is implemented using the Python programming language, leveraging modules such as NumPy, SciPy, and scikit-learn (sklearn) (Türeci, R. G. (2022)).

Artificial Neural Networks (ANN) represent a sophisticated form of the Logistic Regression (LR) algorithm, which gives binary outcomes (true or false). In contrast to LR, ANN incorporates hyperparameters that depend on both the dataset and the expertise of the programmer. In this study, the hyperparameters that are considered include epoch, number of neurons, test size, validation split, and batch size, all of which are crucial for optimising model performance. The selection of these hyperparameters is informed by prior experience with the data.

The process of data transmission through sequential layers, commencing from the input layer and culminating in the output layer, is designated as forward propagation. Upon reaching the output layer, a comparison is made between the data and the test data, resulting in the calculation of an error value. Within the domain of machine learning, this error is designated as 'loss'. The data is then sent back to the input layer using the back propagation algorithm, based on the loss value obtained. This completes one cycle, and the number of cycles is termed an epoch. The number of epochs is thus a measure of iteration.

The activation function plays a crucial role in ensuring the transmission of data from one neuron in a hidden layer to the neuron in the subsequent hidden layer. The activation function is therefore pivotal in triggering the subsequent neuron. In this study, the Elu and ReLu activation functions (Xu, B., et al. (2015)) are employed.

It is imperative that the activation function is differentiable, since the back propagation algorithm is initiated following the calculation of the loss value, thereby activating the optimiser. The Adam optimizer (Kingma, D. P., Ba, J. L. (2017)) is utilised to optimise the coefficients from neuron to neuron employing the gradient descent method. The Adam optimizer has become the most prevalent and successful optimizer function in contemporary research.

The objective of this study is to utilise a MoS₂ structure under strain effects and to apply artificial intelligence to MoS₂, optimised, semi-metal, and metallic states.

The discussion will encompass the potential applications of artificial intelligence in MoS₂ and the advantages thereof. Following the conclusion of this study, the intention is to apply artificial intelligence to other TMDs.

The structure of the paper is as follows: in the Materials and Methods section, the methods and parameters used in the DFT

and PR calculations are outlined, including Elu and LRelu. The Results section determines the atomic structure and lattice constant of MoS₂ via total energy optimization. In the same section, the density of states is calculated and artificial intelligence is applied for optimised, semi-metal and metallic states. Energy band graphics are rendered using QE, while VBM and CBM graphics are produced using PR, Elu and LRelu for optimised, semi-metal and metallic states. The results pertaining to the calculations and artificial intelligence are presented. Finally, the conclusions are presented.

Materials and Methods

Firstly, a detailed analysis of the two-dimensional (2D) hexagonal structure of MoS₂ is presented with the aim of achieving an optimal honeycomb geometry. To this end, Density Functional Theory (DFT) calculations were performed employing the Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) generalised gradient approximation exchange-correlation functional (Perdew, P. J., Burke, K. & Ernzerhof, M. (1996)). With an energy cutoff of 350 eV, the Projector Augmented-Wave (PAW) method (Kresse, G. (1999)) was employed.

The conjugate gradient method was used to optimise the geometry on a fully relaxed unit cell containing two atoms. Vacuum layers were introduced to ensure a separation of 10 Å to avoid interactions through the plate thickness, and normal boundary conditions were applied in all directions. To evaluate the mechanical properties and calculate the electronic density of states, sampling from the Brillouin zone was performed using a 12×12×1 k-point grid. The Monkhorst-Pack grid with a 12×12×1 k-point configuration was utilised to ensure the attainment of accurate results, based on the Brillouin zone sampling framework (Chadi, D. J., Cohen, M. L. (1973), Monkhorst, H. L., Pack, J. D. (1976)).

Following the optimisation of the structure, uniaxial strain was employed. The unit cell parameter was subjected to a strain of 1% in each iteration. In the MoS₂ structure, the vertical strain is neglected (Mortazavi, B., Rahaman, O., Dianat, A. & Rabczuk, T. (2016), Şahin, H., et al. (2009)). Subsequently, the atom positions were recalculated for each step of straining (1%). Following the application of the strain conditions, the optimised geometry was performed using conjugate gradient energy, with the energy convergence criterion set at 10E-5. Finally, strain result calculations were taken for MoS₂ in the optimised +9%, +12% and -15% strained geometries.

Results and Discussions

The initial focus is on the optimised lattice parameter. Subsequent to ascertaining the optimal lattice parameter, the total energy values for each lattice parameter were determined by subjecting the lattice parameter to strain in ±3% steps. As demonstrated in Figure 1, the MoS₂ structure exhibits a single minimum in the total energy versus lattice parameter space of the 2D hexagonal Bravais lattice, akin to that observed in C (Graphene) and BN (Boron Nitride). This observation indicates that the MoS₂ structure maintains a planar configuration. In addition to the planar geometry, the MoS₂ structure also exhibits a low-buckled (LB) geometry.

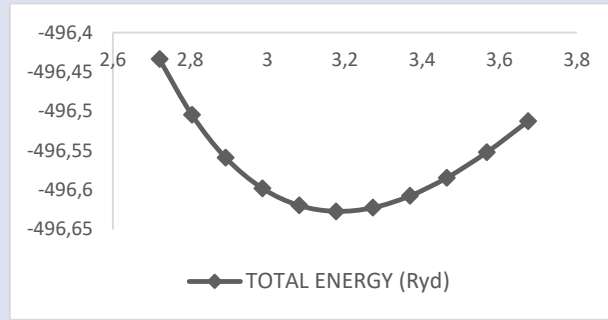
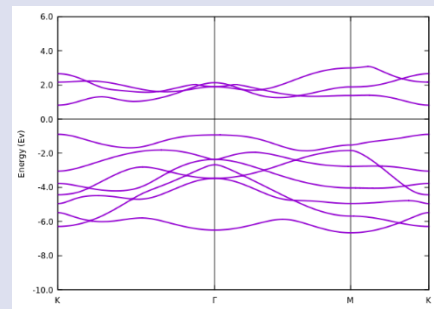
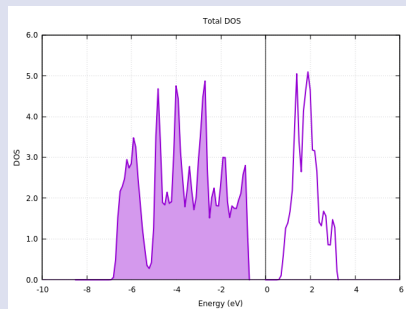
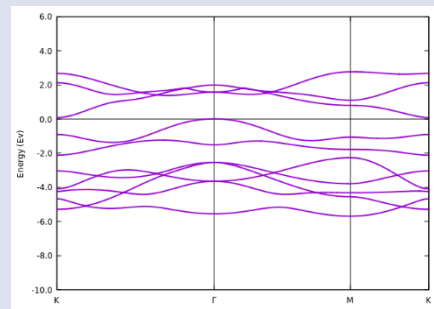
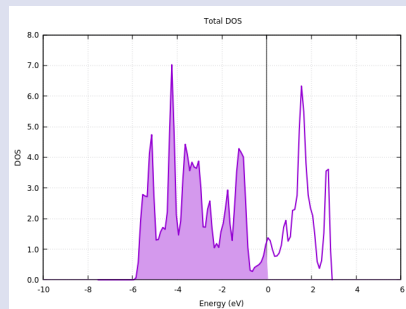


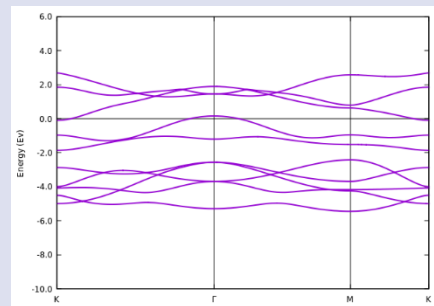
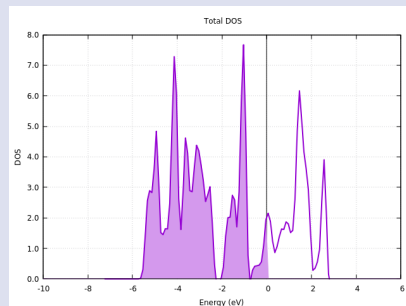
Figure 1. Variation of total energy (Ryd) versus lattice parameter (in Å) of MoS₂ 2D-honeycomb structure.



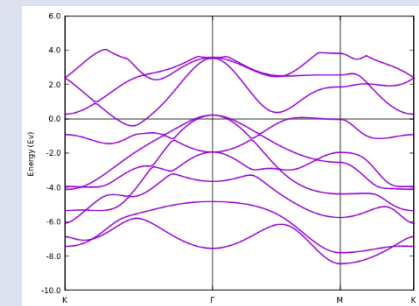
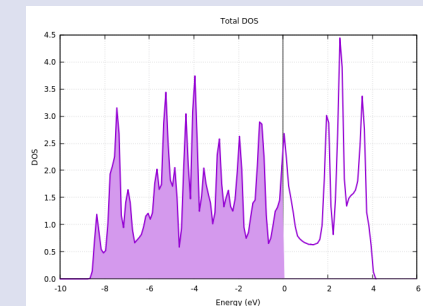
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 2. DOS versus energy band graphics for optimised (a), +9% (b), +12% (c) and -15% (d) strained geometries.

In the presence of uniaxial strain, the energy bandgap value decreases with increasing tensile strain. Furthermore, the transition from semiconductor to semi-metal and semi-metal to metal occurs when the uniaxial strain takes higher values (Mortazavi, B., Rahaman, O., Dianat, A. & Rabczuk, T. (2016)).

Initially, the optimised lattice parameter under strain was calculated by assigning a value less than 0.5 kBar, and the Fermi energy value was set to zero in all the graphs drawn, as illustrated in Figure 2(a, b, c, d, e). The optimised geometry a_0 lattice parameter was found to be 3.1771 Å.

In this study, density of states (DOS) and energy versus band graphics using high symmetries points (K, r, M) were plotted by increasing and decreasing the lattice parameter by 1%. Only the graphics of the structure at the transition to the semi-metal and metal structure were included. It was observed that the structure exhibited semi-metallic properties upon compressing the optimised lattice parameter by +9% ($a=3.4630$ Å), at which point the VBM and the CBM came into contact with each other at the high symmetry points K and r. Furthermore, the structure demonstrated metallic properties under applied stresses greater than +9% ($a=3.4630$ Å), for example +12% ($a=3.5667$ Å) and -15% ($a=2.8045$ Å). The following text is an excerpt from the aforementioned source:

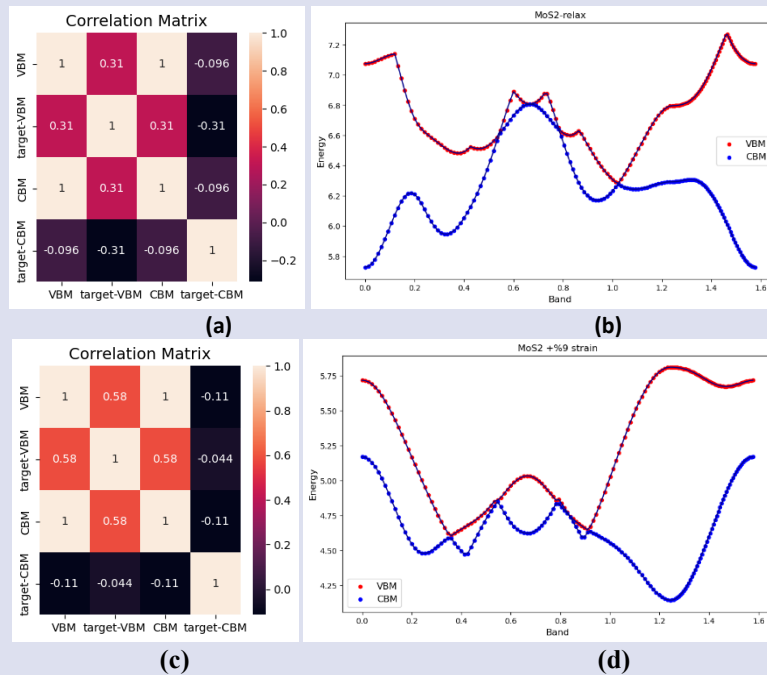
The process whereby bands at different high-symmetry points interact or interweave is designated as an indirect transition. The article provides a numerical example of the metallic behaviour of MoS₂ in the form of graphs obtained by compressing the lattice parameter +12% ($a=3.5667$ Å) and -15% ($a=2.8045$ Å).

These results demonstrate that the lattice parameter of the MoS₂ structure transforms firstly into a semi-metal and subsequently into a metal under strains.

3.1. Application of polynomial regression. The generation of a training data set for the valence band minimum and the conduction band maximum is imperative, as the objective is to undertake data mining of the electronic band structure of MoS₂ in the vicinity of the Fermi energy level. It is imperative for the ANN to function effectively. It is noteworthy that the data set under consideration encompasses a substantial number of data sets, numbering in the thousands. However, to date, only 150 data sets have been calculated, based on the number of valence band minimum and conduction band maximum for the optimised geometry, the semi-metallic geometry, the metallic geometry and the insulator geometry.

The PR application for VBM and CBM values is also considered. Initially, the correlation matrix must be examined. This will demonstrate the relationships between the parameters, which are referred to as features in the context of machine learning. A linear relationship between two parameters is indicated by a proximity to unity in the relationship between them. The nature of the relationship between the parameters is longitudinal; however, if the relationship approaches a negative value, the gradient is negative. If the relationship is close to zero, the parameters are still longitudinal, but the gradient of the line will be negative. It is noteworthy that no relationship is observed between the two parameters when the relationship is close to zero.

Figure 3 presents the correlation matrix for MoS₂ for relaxed, +9%, +12% and -15% strained geometries.



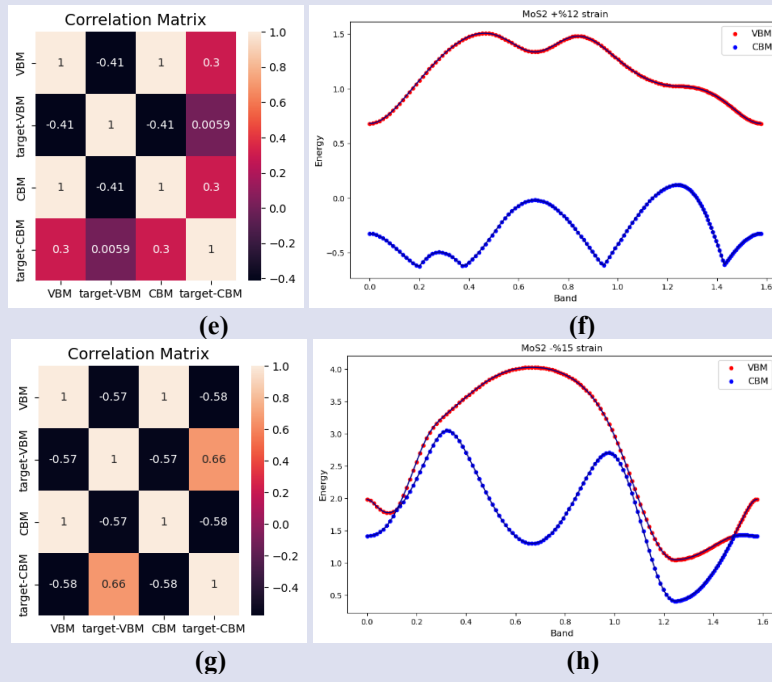


Figure 3. (a), (c), (e), (g) represent the correlation matrix for energy and band values for optimised and +9%, +12%, -15% strained geometries. (b), (d), (f), (h) represent the behavior of calculated energy versus band values.

The MoS₂ structure demonstrates insulating properties within the optimised geometry. At a straining effect of +9%, the material exhibits semi-metallic properties, while under the same straining effect, it demonstrates metallic properties.

The correlation matrix for each geometry and the energy band graphics are presented in Figure 3. As illustrated in Figure 3(a, c, e, g), the correlations between the energy and band values are 0.31, 0.58, -0.41, -0.58 for VBM values, and -0.096, -0.11, 0.3, 0.41 for CBM values, respectively, for the optimised geometry and +9%, +12% and -15% strained geometries, respectively. The use of the minus sign indicates a downward slope, while the plus sign

indicates an upward slope. This observation is consistent with the findings depicted in Figure 3(b, d, f, h), which illustrate the curvilinear nature of the results.

The polyfit method, utilised within the numpy module, facilitates the implementation of polynomial regression on the training data. The coefficients and R² values corresponding to the optimised and strained geometries are given in Table 1 for VBM and in Table 2 for CBM. The graphs for the optimised and strained geometries are plotted in Figure 4 for CBM and Figure 5 for VBM. The R² values are indicative of the model's accuracy. It is evident that as the R² values approach one, the consistency of the model is enhanced.

Table 1. The polynomial coefficients for VBM

Polyn. Coeff.	Relaxed Geo.	+9% Strain	+12% Strain	-15% Strain
R ²	0.9814	0.9987	0.9995	0.9993
a ₀	7.126	5.696	0.6775	1.433
a ₁	-16.21	6.3	0.5411	-4.275
a ₂	718.8	-297.2	72.52	162.6
a ₃	-1.186E04	4903	72.52	-1294
a ₄	1.016E05	-4.523E04	874.6	35.97
a ₅	-5.352E05	2.541E05	-1.723E04	7.451E04
a ₆	1.879E06	-9.358E06	1.137E05	-5.705E05
a ₇	-4.599E06	2.371E07	-4.201E05	2.206E06
a ₈	8.06E06	-4.255E06	9.894E05	-5.294E06
a ₉	-1.024E07	5.486E06	-1.57E06	8.498E06
a ₁₀	9.451E06	-5E093E06	1.718E06	-9.402E06
a ₁₁	-6.265E06	3.371E06	-1.303E06	7.209E06
a ₁₂	2.905E06	-1.552E06	6.723E05	-3.768E06
a ₁₃	-8.Ç938E05	4.716E05	-2.257E05	1.282E06
a ₁₄	1.638E05	-8.504E04	4.444E04	-2.562E05
a ₁₅	-1.353E04	6892	-3899	2.28E04

Table 2. The polynomial coefficients for CBM

Polyn. Coeff.	Relaxed Geo.	+%9 Strain	+%12 Strain	-%15 Strain
R^2	0.9962	0.9766	0.9766	0.9997
a_0	5.0704	5.176	-0.3389	-2.999
a_1	7.972	-3.337	2.107	-8.507
a_2	-355.2	158.4	-68.69	336.8
a_3	7345	-3744	456	-6513
a_4	-7.2E04	3.842E04	-1609	5.862E04
a_5	4.04E05	-2.274E05	9364	-3.204E05
a_6	-1.484E06	8.742E05	-6.674E04	1.171E06
a_7	3.712E06	-2E311E06	2.931E05	-2.992E06
a_8	-6.592E06	4.358E06	-7.834E05	5.478E06
a_9	8.445E06	-5.833E06	1.356E06	-7.257E06
a_{10}	-7.826E06	5.67E06	-1.578E06	6.957E06
a_{11}	5.194E06	-3.939E06	1.251E06	-4.773E06
a_{12}	-2.405E06	1.906E06	-6.679E05	2.281E06
a_{13}	7.378E05	-6.104E05	2.304E05	-7.209E05
a_{14}	-1.346E05	1.161E05	-4.64E04	1.352E05
a_{15}	1.106E04	-9943	4150	-1.14E04

We can predict new data after obtaining the polynomial coefficients. ANN results are given as the predicted values.

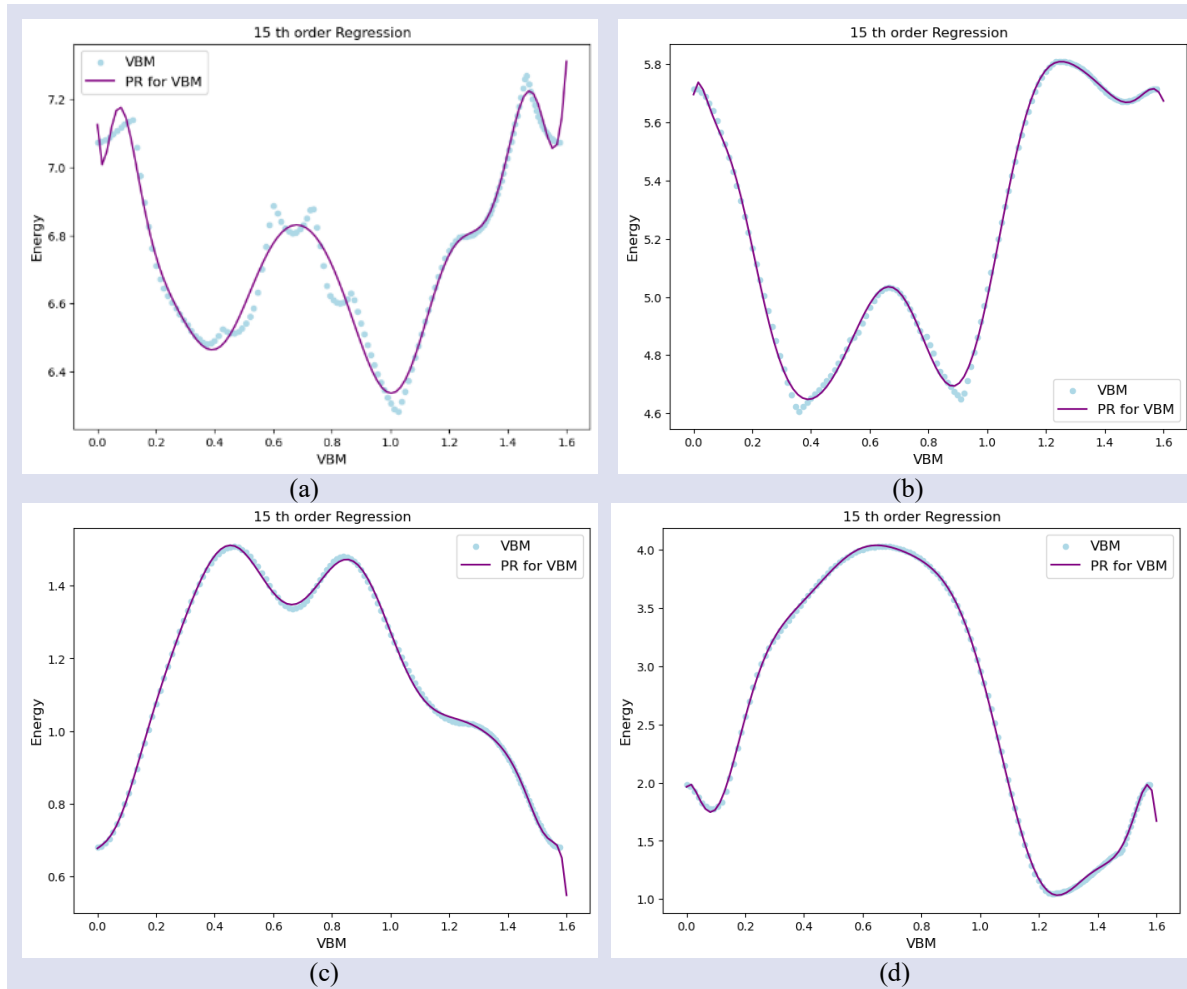


Figure 4. Energy versus band plots for optimised (a), +%9 (b), +%12 (c) and -%15 (d) strained geometries by applying 15th polynomial regression for VBM.

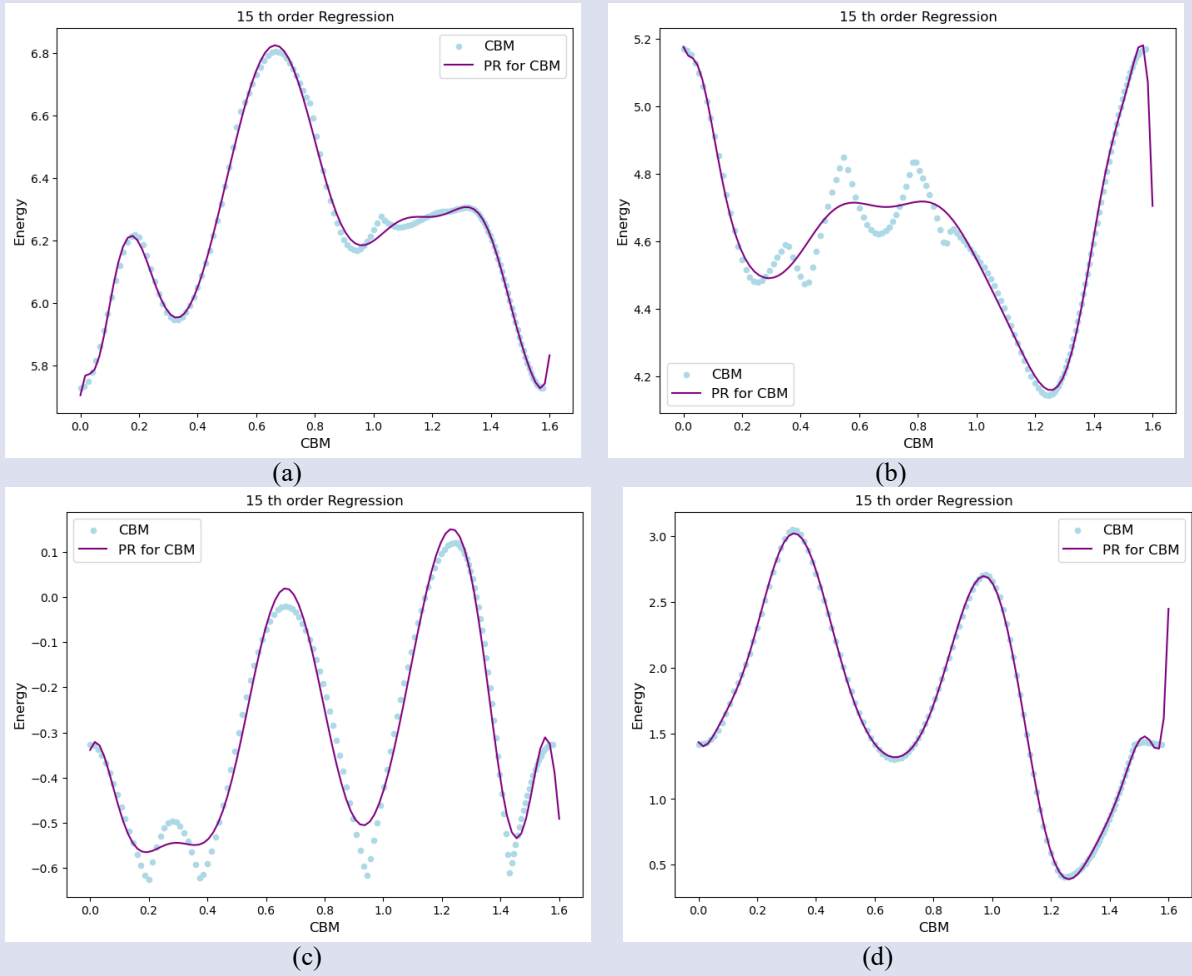


Figure 5. Energy versus band graphics optimised (a), +9% (b), +12% (c) and -15% (d) strained geometries by applying 15th polynomial regression for CBM.

3.2. ANN applications. An application of ANN is different from an application of PR. ANN includes hyperparameters that depend on the type of problem and the user data. Unfortunately, experience and the type of problem determine the values or situations of these

hyperparameters. It is important to note that there is no linear relationship between these hyper-parameters. The hyperparameters used for each problem are given in Table 3.

Table 3. The ANN hyperparameters used in this work.

Hyperparameters	Relaxed Geo.	+9% Strain	+12% Strain	-15% Strain
Numbers of neurons	60	40	30	40
Epoch number	900	800	850	900
Batch size parameter	1	1	1	1
Test size	0,3	0,3	0,3	0,3
Validation split number	0,3	0,3	0,3	0,3
Optimizer	adam	adam	adam	adam
Activation function	LRelu	LRelu	LRelu	LRelu

ANN results run Leaky Relu and Elu and 15th order PR results for VBM and their loss plots are shown in Figs. 6 and 7, respectively. ANN and PR results for CBM are shown in Fig. 8 and Fig. 9. To avoid confusion, these figures are shown separately. The results show that PR works well for a wide range of training data. However, the

PR results are not satisfactory for the range of out-of-training data. The ANN results are acceptable. ANN performs better than PR on the training data set. In Figure 10, the MoS₂ optimised, semi-metallic and metallic states for VBM and CBM are presented as a single graph for comparison and to make it easier to see the differences.

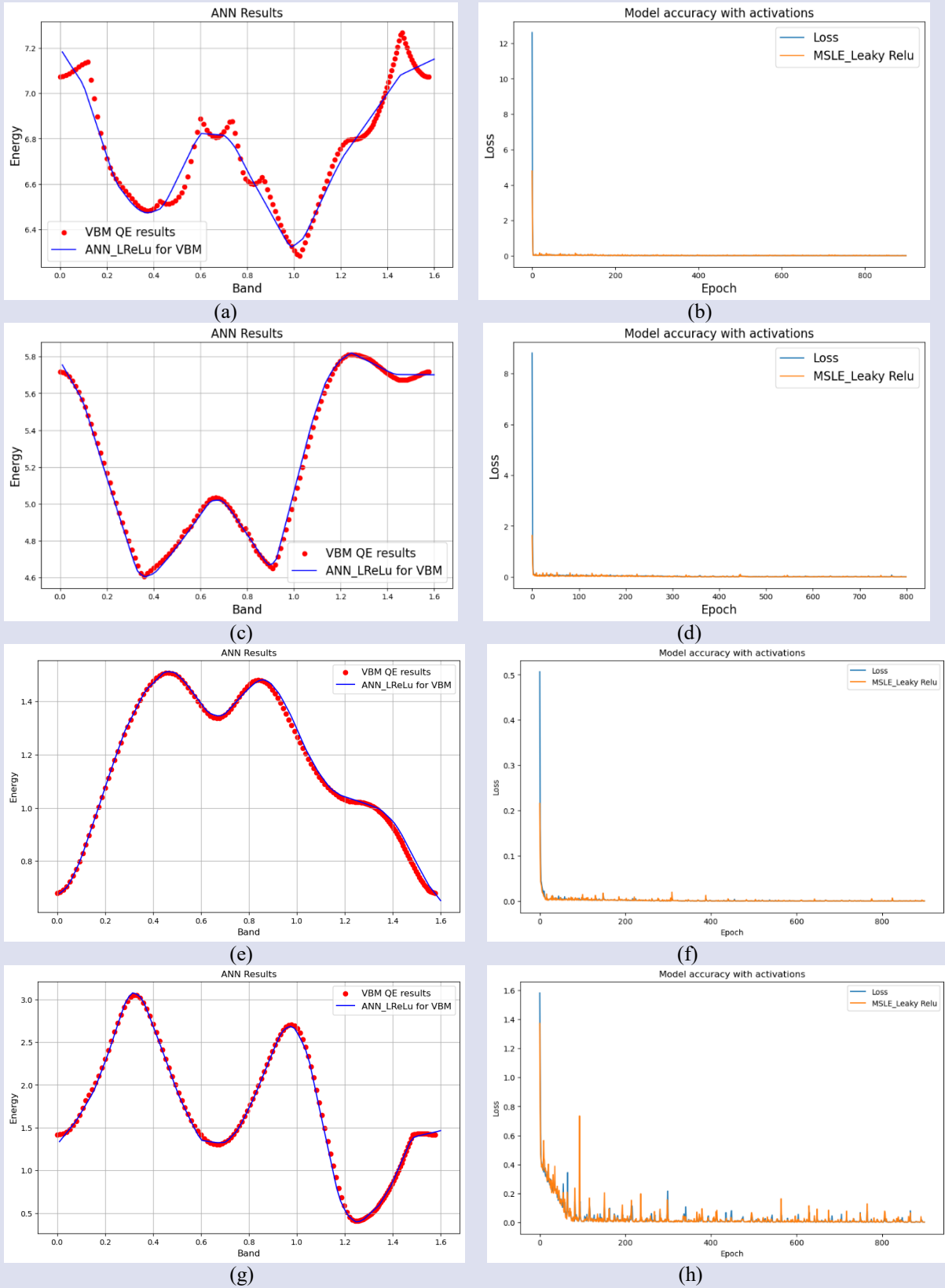


Figure 6. Graphs obtained for the optimised (a, b), +9% (c, d), +12% (e, f) and -15% (g, h) strained geometries and their loss graphs using VBM QE values and Relu.

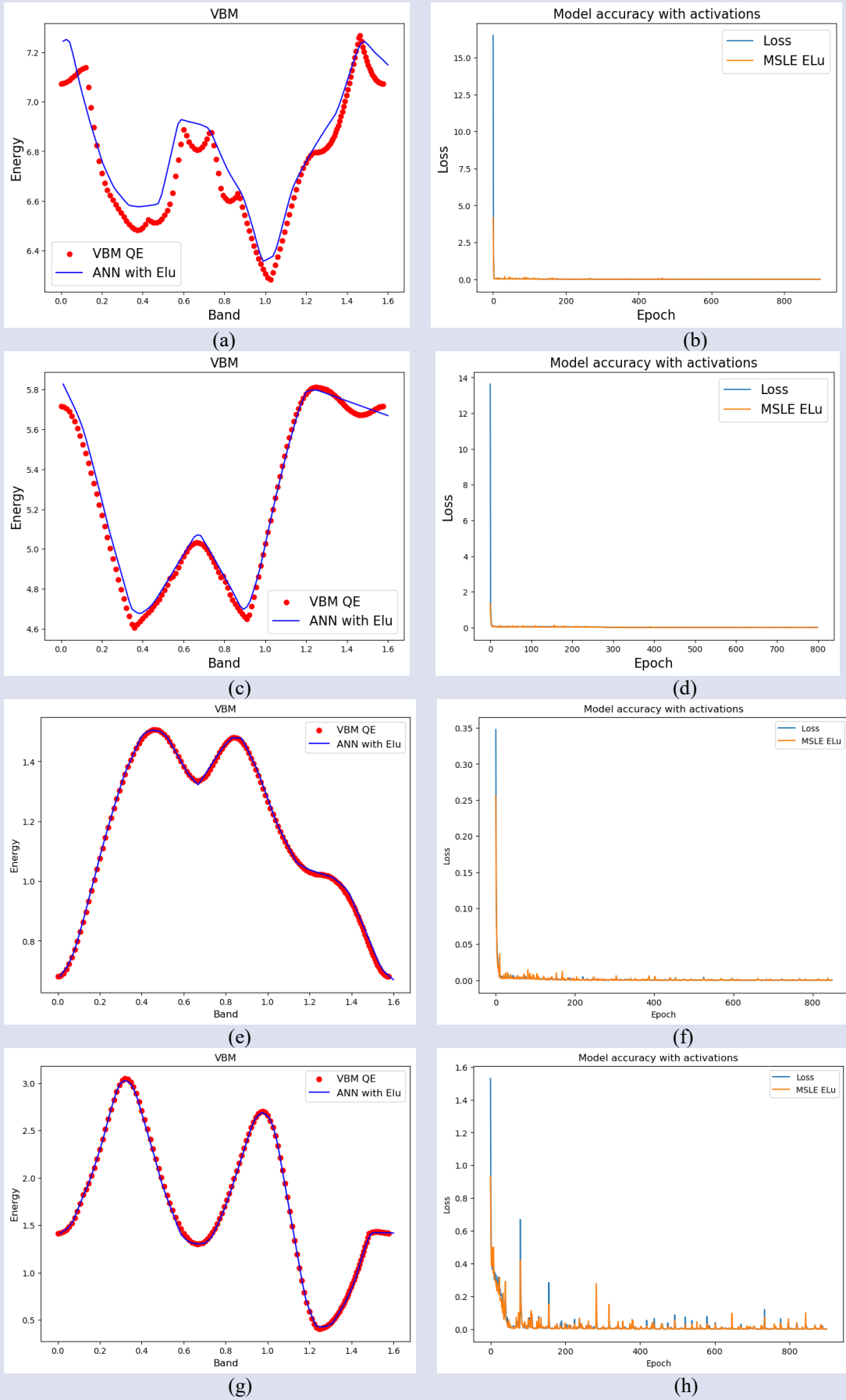


Figure 7. Graphs obtained for the optimised (a, b), +9% (c, d), +12% (e, f) and -15% (g, h) strained geometries and their loss graphs using VBM QE values and Elu.

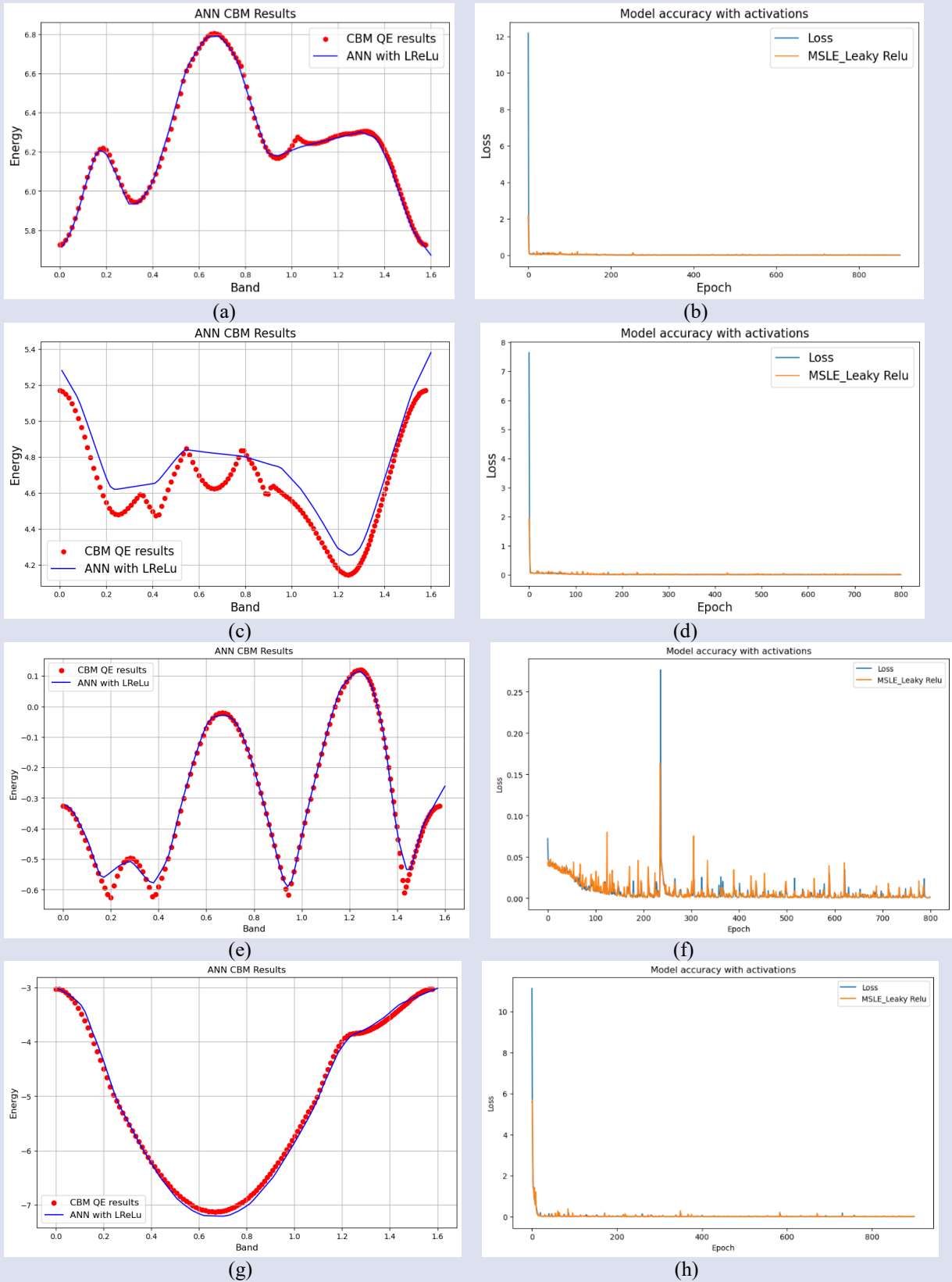


Figure 8. Graphs obtained for the optimised (a, b), +9% (c, d), +12% (e, f) and -15% (g, h) strained geometries and their loss graphs using CBM QE values and Relu.

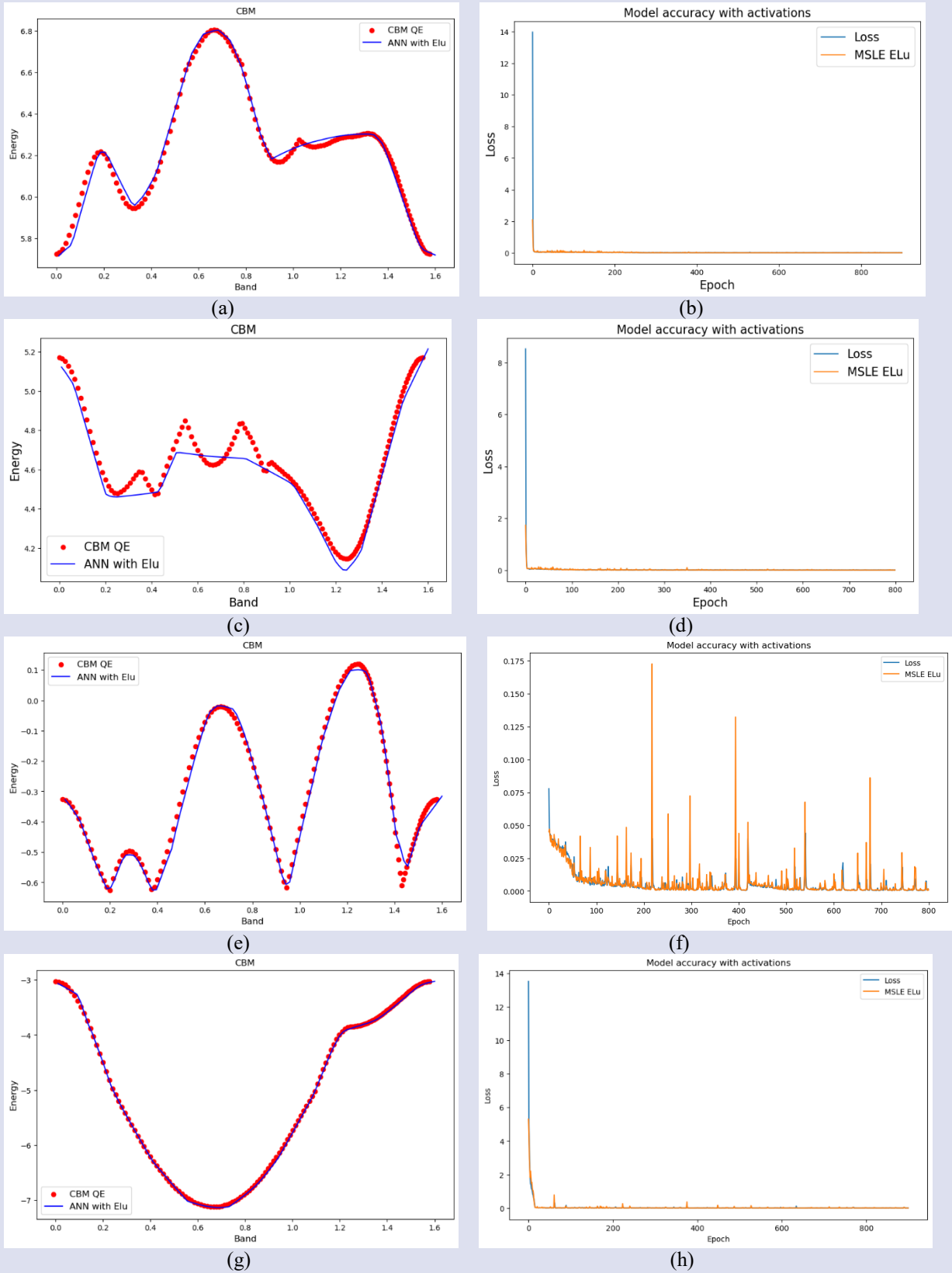


Figure 9. Graphs obtained for the optimised (a, b), +9% (c, d), +12% (e, f) and -15% (g, h) strained geometries and their loss graphs using CBM QE values and Elu.

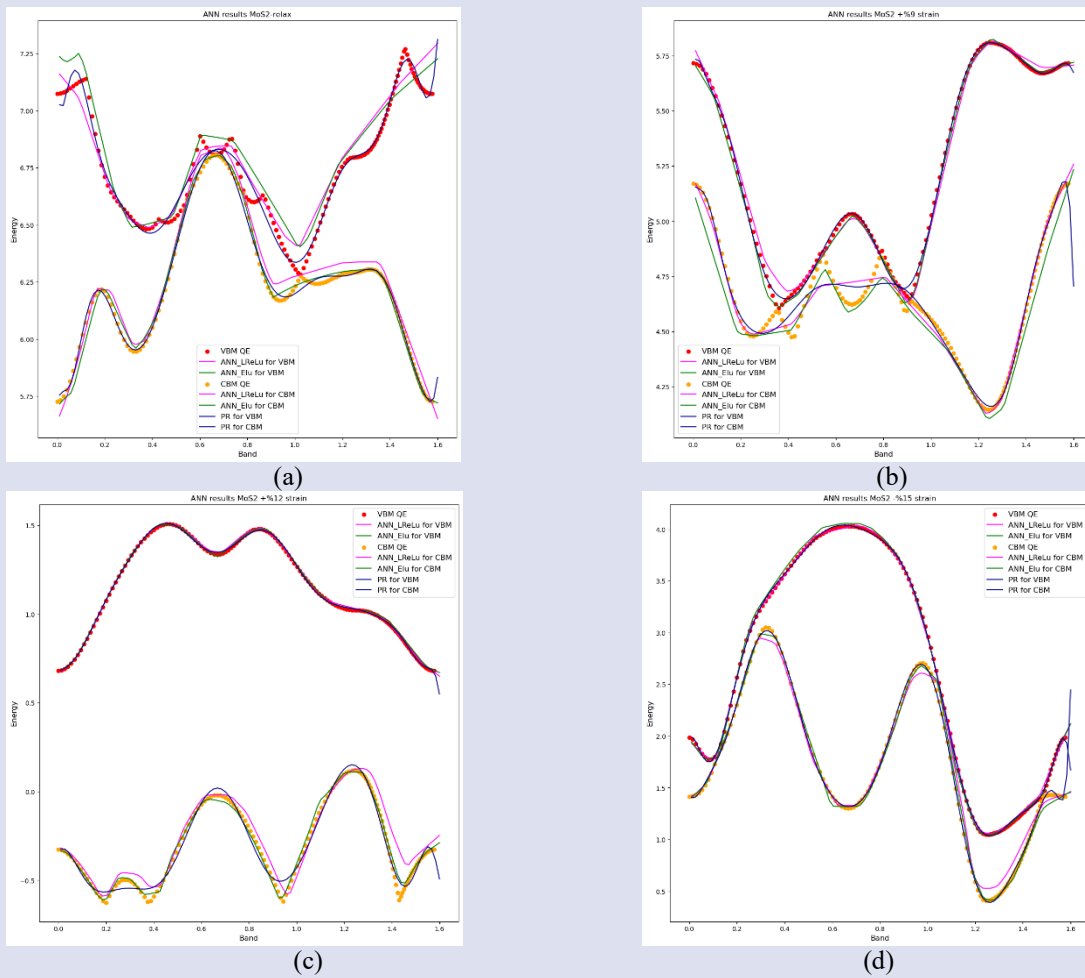


Figure 10. Graphs obtained for the optimised (a), +9% (b), +12% (c) and -15% (d) strained geometries and their loss graphs using CBM and VBM PR values, ANN Elu and LRelu for VBM and CBM.

Conclusions

This study addressed the problem of electronic band transitions in MoS₂ using two different machine learning algorithms, namely PR and ANN. The findings revealed that the MoS₂ structure manifests semi-metallic properties under specific values of the lattice parameter when subject to strain, and metallic properties when the value of this parameter is increased or decreased. An indirect transition, in which the material exhibits half-metallic properties, was observed at the high symmetry points of K and r. The present study focuses on the analysis of the VBM and CBM data. The subsequent analysis employs data obtained through the utilisation of the UYBHM. These data serve as the foundation for the subsequent analysis.

The findings of this study demonstrate that the efficacy of machine learning applications is contingent on the magnitude of the training data. In this instance, the research has been conducted with a limited amount of data. Specifically, for VBM and CBM, the dataset consists of 150 unique data points.

The findings indicate that PR is only capable of yielding satisfactory outcomes for the specific range of data employed during model training. Beyond this range, PR's performance deteriorates significantly. Consequently, the predictions derived from PR should be constrained to the range of the training data. In contrast, ANN demonstrates a superior

performance, both within and outside the range of the training data. Despite the computational expense of ANN, its efficacy in data analysis renders it a valuable tool. ANN incorporates hyperparameters, which are a distinctive feature of this model.

It is evident that a linear relationship between the hyperparameters of an ANN is not applicable. Table 3 provides a comprehensive overview of the hyperparameters employed in this study.

It is evident that by constructing a more extensive neural network comprising 15 hidden layers as opposed to the conventional 15, the performance of the ANN is rendered unsuitable for the context of longitudinal performance. Conversely, an ANN with a reduced number of layers will also produce an inaccurate result. It is important to note that this comparison is valid only for the number of hidden layers. It is possible to make similar comparisons for other hyperparameters, for example the number of neurons, the activation function and the optimiser. For instance, if one were to presume a greater number of neurons to be available, the ANN would consequently yield an erroneous outcome. It is important to note that the hyper-parameters employed in this study remain valid for the specific set of training data that was utilised. However, it is acknowledged that the hyperparameters may be updated if a richer data set is employed.

Conflicts of Interest

The author declares that there is no conflict of interest in this respect.

Acknowledgements

This work was carried out using the infrastructure of the National High Performance Computing Centre of Turkey (UYBHM).

References

- Bertolazzi, S., Brivio, J. & Kis, A. (2011). Stretching and breaking of ultrathin MoS₂. *ACS Nano*, 5, 9703-9709. <https://doi.org/10.1021/nn203879f>.
- Chadi, D. J., Cohen, M. L. (1973). Special Points in the Brillouin Zone. *Phys. Rev. B*, 8, 5747-5753. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.8.5747>.
- Chhowalla, M., et al. (2013). The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nature Chemistry*, 5(4), 263-275. <https://doi.org/10.1038/nchem.1589>.
- Giannozzi, P., et al. (2009). QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials. *J. Phys: Condens. Matter*, 21, 395502, 1-19. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/39/395502>.
- Giannozzi, P., et al. (2020). Quantum ESPRESSO toward the exascale. *J. Chem. Phys.*, 152, 154105, 1-11. <https://doi.org/10.1063/5.0005082>.
- Kingma, D. P., Ba, J. L. (2017). Adam: A method for Stochastic Optimization. *arXiv:1412.6980v9*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>.
- Kresse, G. (1999). From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method. *Phys. Rev. B*, 59, 1758-1775. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.1758>.
- Monkhorst, H. L., Pack, J. D. (1976). Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys. Rev. B*, 13, 5188-5192. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.13.5188>.
- Mortazavi, B., Rahaman, O., Dianat, A. & Rabczuk, T. (2016). Mechanical responses of borophene sheeys: a first-principles study. *Chem. Phys.*, 18, 27405-27413. <https://doi.org/10.1039/c6cp03828j>.
- Novoselov, K. S., et al. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306, 666-669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>.
- Perdew, P. J., Burke, K. & Ernzerhof, M. (1996). Generalized Gradient Approximation Made Simple. *Phys. Rev. Lett.*, 77, 3865-3868. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865>.
- Splendiani, A., et al. (2010). Emerging photoluminescence in monolayer MoS₂. *Nano Letters*, 10(4), 1271-1275. <https://doi.org/10.1021/nl903868w>.
- Şahin, H., et al. (2009). Monolayer honeycomb structures of group-IV elements and III-V binary compounds: First-principles calculations. *Physical Review B*, 80(15), 155453-(1-12). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.155453>.
- Türeci, R. G. (2022). Machine Learning Applications to the One-speed Neutron Transport Problems. *Cumhuriyet Science Journal*, 43, 726-738. <https://doi.org/10.17776/csj.1163514>.
- Wang, Q. H., et al. (2012). Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nature Nanotechnology*, 7, 699-712. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.193>.
- Xu, B., et al. (2015). Empirical Evaluation of Reflected Activations in Convolutional Network. *arXiv:1505.00853v2*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.00853>.
- Zhan, Y., et al. (2012). Large-area vapor-phase growth and characterization of MoS₂ atomic layers on a SiO₂ substrate. *Small*, 8 (7), 966-971. <https://doi.org/10.1002/sml.201102654>.



Investigation of the Effects of Suspension pH, Stirring Speed, Stirring Time, and Solid Ratio on Feldspar Flocculation Using Non-Ionic Flocculants

Özlem Kaya^{1,a,*}, Ahmet Özkan^{2,b}

¹ Sivas Cumhuriyet University, Engineering Faculty, Metallurgical and Materials Engineering Department, 58140 Sivas, Türkiye

² Republic of Türkiye Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, 06510 Ankara, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 05/05/2025

Accepted: 16/06/2025

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

In this study, two different non-ionic flocculants (Magnaflow 333 and Magnaflow 351) were used for flocculation of feldspar suspensions and the effects of basic process parameters such as suspension pH, stirring speed, stirring time, and solid ratio on feldspar flocculation performance were investigated. The flocculation performance was evaluated together with suspension turbidity (NTU) and flocculation efficiency (%). The experimental results showed that the optimum conditions for both flocculants were suspension pH of 6.1, stirring speed of 500 rpm, and stirring time of 2 minutes. Under these conditions, 97.4% flocculation efficiency and 10.4 NTU turbidity were obtained with Magnaflow 333, and 98.5% flocculation efficiency and 6.4 NTU turbidity were obtained with Magnaflow 351. The optimum solid ratio for Magnaflow 333 was found to be 0.5% and 99.1% flocculation efficiency and 4.0 NTU turbidity. For Magnaflow 351, the optimum solid ratio was 0.2%, and 98.5% flocculation efficiency and 6.4 NTU turbidity were obtained. The results obtained provide important data for process design and optimization for flocculation of feldspar containing systems.

Keywords: Turbidity, feldspar, flocculation efficiency, non-ionic flocculant

Feldspat Flokülasyonunda Süspansiyon pH'sı, Karıştırma Hızı, Karıştırma Süresi ve Katı Oranının Etkilerinin Non-İyonik Flokülantlar Kullanılarak İncelenmesi

Araştırma Makalesi

Süreç

Geliş: 05/05/2025

Kabul: 16/06/2025

ÖZ

Bu çalışmada, feldspat süspansiyonlarının flokülasyonu için iki farklı non-iyonik flokülant (Magnaflow 333 ve Magnaflow 351) kullanılmış ve süspansiyon pH'sı, karıştırma hızı, karıştırma süresi ve katı oranı gibi temel proses parametrelerinin feldspat flokülasyon performansını üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Flokülasyon performansı, süspansiyon bulanıklığı (NTU) ve flokülasyon verimi (%) ile birlikte değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, her iki flokülant için optimum koşulların süspansiyon pH'sının 6.1, karıştırma hızının 500 dev/dk. ve karıştırma süresinin 2 dakika olduğunu göstermiştir. Bu koşullarda, Magnaflow 333 ile %97.4 flokülasyon verimi ve 10.4 NTU bulanıklık elde edilirken, Magnaflow 351 ile %98.5 flokülasyon verimi ve 6.4 NTU bulanıklık elde edilmiştir. Magnaflow 333 için optimum katı oranı %0.5 olarak bulunmuş ve %99.1 flokülasyon verimi ve 4.0 NTU bulanıklık elde edilmiştir. Magnaflow 351 için ise optimum katı oranı %0.2 olup, %98.5 flokülasyon verimi ve 6.4 NTU bulanıklık elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, feldspat içeren sistemlerin flokülasyonuna yönelik proses tasarımı ve optimizasyonu için önemli veriler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bulanıklık, feldspat, flokülasyon verimi, non-iyonik flokülant

^a okaya@cumhuriyet.edu.tr

^{ID} 0000-0001-7613-3609

^b aozkan725@gmail.com

^{ID} 0000-0002-7544-3709

How to Cite: Kaya O, Ozkan A (2025) Investigation of the Effects of Suspension pH, Stirring Speed, Stirring Time, and Solid Ratio on Feldspar Flocculation Using Non-Ionic Flocculants, Journal of Science and Technology, 4(1): 51-58

Giriş

Feldispatlar, yerkabuğunun yaklaşık %60-65'ini oluşturan, benzer kristal yapı ve kimyasal özelliklere sahip susuz alümina silikat mineralleridir. Alkali metal içeriğine göre kalsiyum (Ca), sodyum (Na) ve potasyum (K) feldispatları olmak üzere üç ana gruba ayrılırlar. Ticari öneme sahip başlıca feldispat mineralleri anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ve mikrolin veya ortoklaz (KAlSi_3O_8)'dır. Türkiye'de özellikle Batı Anadolu bölgesinde yoğunlaşan rezervleri ile feldispatlar; seramik, cam, boya ve kâğıt endüstrileri başta olmak üzere birçok sektörde önemli rol oynamaktadır. Seramik sektöründe feldispat, vitrifiye sıcaklığını düşürerek camsı faz oluşumunu kolaylaştırmakta ve ürünün mekanik dayanımını artırmaktadır. Cam üretiminde feldispat, düşük ergime sıcaklığı sağlayan bir flaks (eritici) görevi yapmakta ve camın kimyasal direncini ve termal dayanıklılığını artırmaktadır. Boya endüstrisinde dolgu maddesi olarak kullanılan feldispat, boyaya parlaklık, viskozite kontrolü ve düzgün yayılma gibi işlevsel özellikler kazandırmaktadır. Kâğıt endüstrisinde ise feldispat, yüzey pürüzsüzlüğü ve opaklık gibi fiziksel özellikleri artıran bir katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Kılıç, 2023).

Flokülasyon, katı-sıvı ayırma prosesleri arasında; madencilik ve cevher hazırlama, atık su arıtımı, kâğıt endüstrisi ve biyoteknoloji gibi çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Özellikle ince taneli ve koloidal sistemlerde, alternatif arıtma yöntemleri ile karşılaştırıldığında; uygulama kolaylığı, düşük enerji tüketimi, ekonomik avantajları ve çevresel açıdan sürdürülebilirliği ile öne çıkmaktadır (Dao et al., 2016; Gregory and Barany, 2011). Flokülasyon, özellikle madencilik ve cevher hazırlama endüstrisinde önemli bir yer tutmaktadır. Cevher zenginleştirme işlemleri sonrasında oluşan ince taneli atıkların uzaklaştırılması, hem ekonomik ve hem de çevresel açıdan büyük önem taşımaktadır. Flokülasyon; çöktürme tankları, yoğunlaştırıcılar ve filtreleme ünitelerinde katıların hızlı ve etkin bir şekilde ayrılmasını sağlayarak proses verimliliğini artırmaktadır.

Flokülasyon, süspansiyon halindeki ince taneli katı partiküllerin uygun flokülantlar kullanılarak aglomere edilerek

çökelmeye uygun "flok" adı verilen daha büyük yapılar oluşturmaları işlemidir. Bu işlem, genellikle yüksek molekül ağırlıklı organik ve inorganik polimerik flokülantlar kullanılarak gerçekleştirilir. Flokülantlar, sahip oldukları iyonik karaktere bağlı olarak dört ana gruba ayrılmaktadır: non-iyonik, katyonik, anyonik ve amfoterik flokülantlar (Drzymala, 2007; Wills and Napier-Munn, 2006). Flokülantların etki mekanizması; yüzey yükü nötralizasyonu, köprüleme (bridging), hidrofobik etkileşimler veya polimerik ağ yapılarının oluşumu gibi fizikokimyasal prensiplere dayanmaktadır.

Flokülasyon etkinliği, kullanılan flokülantın yapısal özelliklerine ve uygulama koşullarına bağlı olarak önemli değişkenlik göstermektedir. Flokülantın türü ve miktarı, molekül ağırlığı, zincir uzunluğu ve elektriksel yükü gibi faktörler, parçacıklarla olan etkileşim mekanizmasını ve dolayısıyla flok oluşumunu doğrudan etkilenmektedir. Ayrıca, süspansiyon pH'sı, partikül boyutu dağılımı, katı oranı, karıştırma süresi ve hızı, ve ortam sıcaklığı gibi proses parametreleri de flokülasyon performansı üzerinde doğrudan etkilidir (Gregory and Barany, 2011; Yang, 2020). Flokülasyon performansı; genellikle süpernatant bulanıklığı, flok çökme hızı ve flokülasyon verimliliği gibi temel parametreler kullanılarak değerlendirilmektedir (Gregory, 2013).

Bu çalışmada, non-iyonik karakterli Magnafloc 333 ve Magnafloc 351 flokülantları kullanılarak feldispat süspansiyonunun flokülasyon davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda süspansiyon pH'sı, karıştırma hızı, karıştırma süresi ve katı oranı temel proses parametrelerinin, flokülasyon performansını belirleyen bulanıklık ve flokülasyon verimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Materyal ve Metod

Materyal

Deneysel çalışmalar için Muğla/Yatağan Polat Maden San. ve Tic. A.Ş.'ya ait sodyum feldispat ocağından temin edilen feldispat numunesi kullanılmıştır. Numunenin kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de, -90 μm boyutuna öğütülerek kullanılan numunenin tane boyut dağılımı ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Feldispat numunesinin kimyasal analizi

Table 1. Chemical analysis of feldspar sample

SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	TiO ₂ , %	Na ₂ O, %	K ₂ O, %	CaO, %	MgO, %	P ₂ O ₅ , %
70.07	17.34	0.12	0.34	10.64	0.40	0.61	<0.01	0.24

Tablo 2. Feldispat numunesinin tane boyut dağılımı

Table 2. Particle size distribution of feldspar sample

Tane Boyutu (µm)	Ağırlık (%)
-90 + 75	4.82
-75 + 53	14.98
-53 + 45	6.96
-45 + 38	8.28
-38 + 20	27.30
-20	37.66
Toplam	100

Tablo 3. Çalışmada kullanılan flokülanların özellikleri

Table 3. Properties of the flocculants used in the study

Flokülan ismi	Flokülan kodu	Flokülan türü	Fiziksel formu	Molekül ağırlığı
Magnafloc 333	N.333	Non-iyonik	Toz – kırık beyaz	Orta
Magnafloc 351	N.351	Non-iyonik	Toz – kırık beyaz	Orta

Flokülasyon deneylerinde, BASF SE firmasından temin edilen non-iyonik karakterli Magnafloc 333 ve Magnafloc 351 flokülanları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan flokülanların özellikleri Tablo 3’de verilmiştir. Her bir flokülan için %0.5 (a/a) konsantrasyonda stok çözeltileri hazırlanmış; bu stok çözeltilerden %0.05 (a/a) konsantrasyonda seyreltilmiş çalışma çözeltileri hazırlanarak deneylerde kullanılmıştır.

Metod

Her bir flokülasyon deneyi için, 750 ml cam beherde 600 ml saf su içerisine 1 g feldispat eklenerek bir süspansiyon hazırlanmıştır. Süspansiyonun homojenliğini sağlamak amacıyla karışım, 500 dev/dk. hızda 5 dakika süreyle manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Belirlenen flokülan miktarı süspansiyona ilave edilmiş ve 500 dev/dk. hızda 1 dakika karıştırılmıştır. Ardından karıştırma hızı 200 dev/dk.’ya düşürülmüş ve flok oluşumunu sağlamak amacıyla karışım 2 dakika bu hızda karıştırılmıştır. Bu işlemten sonra sistem durdurulmuş ve oluşan flokların çökmesi için süspansiyon 2 dakika bekletilmiştir. Çökme süreci tamamlandıktan sonra, hava-su ara yüzeyinin 4 cm altından 10 ml süpernatant numunesi dikkatli bir şekilde alınmıştır. Alınan süpernatant numunenin bulanıklık ölçümleri, MicroTPI marka turbidimetre (bulanıklık ölçer) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Nephelometric Turbidity

Unit (NTU) cinsinden ifade edilmiştir. Flokülasyon verimi ise aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{Flokülasyon verimi (\%)} = \left[\frac{(T_0 - T_f)}{T_0} \right] \times 100$$

To = Süspansiyonun flokülasyon öncesi bulanıklık değeri (NTU)

Tf = Süspansiyonun flokülasyon sonrası bulanıklık değeri (NTU)

(NTU: Nephelometric Turbidity Unit)

Bulgular ve Tartışma

Muğla/Yatağan bölgesinden temin edilen feldispat mineralinin flokülasyonunda, flokülan türü ve miktarının etkilerinin incelendiği çalışmada, en yüksek flokülasyon verimi ve en düşük bulanıklık sonuçları, non-iyonik karakterli Magnafloc 333 (N.333) ve Magnafloc 351 (N.351) flokülanlarının tekli sistemde kullanımı ile elde edilmiştir (Özkan, 2021). Her iki flokülan için optimum miktarlar 0.8 mg/L olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada, N.333 ve N.351 flokülanları 0.8 mg/L miktarında sabit tutularak kullanılmış; süspansiyon pH’sı, karıştırma hızı, karıştırma süresi ve katı oranı parametrelerinin, süspansiyon bulanıklığı ve flokülasyon verimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Süspansiyon pH’sının etkisi

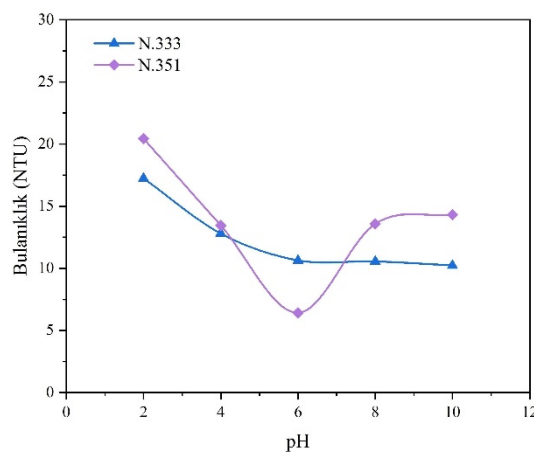
Süspansiyon pH’sının etkisinin incelendiği deneylerde, pH ayarlamaları sodyum hidroksit (NaOH) ve sülfürik asit (H₂SO₄) kullanılarak yapılmıştır.

Deneylerin başlangıcında, 600 ml saf su içerisine 1 g feldispat eklenerek hazırlanan karışım 500 dev/dk. hızında 5 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra karıştırma hızı 150 dev/dk'ya düşürülerek istenilen pH değerleri ayarlanmış ve pH sabitlendikten sonra karıştırma işlemine 5 dakika daha devam edilmiştir. Ardından Metod bölümünde açıklanan flokülasyon deney prosedürü uygulanmıştır.

Başlangıçta feldispat süspansiyonu bulanıklık değeri 430.1 NTU olarak ölçülmüş olup, bu durum süspansiyon içinde oldukça yüksek oranda askıda katı madde bulunduğunu göstermektedir.

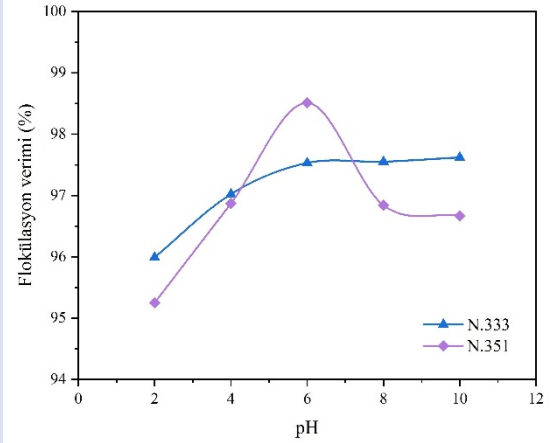
Feldispat flokülasyonunda süspansiyon pH'sının etkisi, pH 2-10 aralığında araştırılmıştır. Deneylerde, feldispat süspansiyonunun ortam pH'sı 6.1 olarak tespit edilmiştir. Süspansiyon pH'sına bağlı olarak bulanıklık değerlerinin değişimi Şekil 1'de, flokülasyon verimi üzerindeki etkisi ise Şekil 2'de gösterilmektedir.

N.333 ve N.351 flokülantlarının süspansiyon bulanıklık değerlerinin asidik pH aralığında (pH: 2-4) yüksek olduğu, süspansiyonun ortam pH'sına (pH: 6.1) yaklaştıkça bu değerlerin azaldığı, ancak pH değerinin alkali seviyelerinde (pH>8) yeniden arttığı görülmektedir (Şekil 1). Bu davranış, asidik pH koşullarında çözeltideki yüksek H^+ iyonu konsantrasyonunun, flokülant molekülleri ile etkileşime girerek flokülantın yüzey özelliklerini değiştirmesi ve flokülant-partikül etkileşimini azaltması sonucu süspansiyon bulanıklığının artması ile açıklanabilir (Cao et al., 2010). Benzer şekilde, alkali pH koşullarında, feldispat yüzeyinin daha negatif yüklenmesi ve elektrostatik itmenin artması, flokülant-partikül etkileşimi olumsuz etkileyerek bulanıklık değerlerinin yeniden artmasına neden olmuştur (Bolto and Gregory, 2007).



Şekil 1. Süspansiyon pH'sının bulanıklığa etkisi [Karıştırma hızı: 500 dev/dk., Karıştırma süresi: 2 dakika, Katı oranı: %0.2]

Figure 1. Effect of suspension pH on turbidity [Stirring speed: 500 rpm, Stirring time: 2 minutes, Solid ratio: 0.2%]



Şekil 2. Süspansiyon pH'sının flokülasyon verimine etkisi [Karıştırma hızı: 500 dev/dk., Karıştırma süresi: 2 dakika, Katı oranı: %0.2]

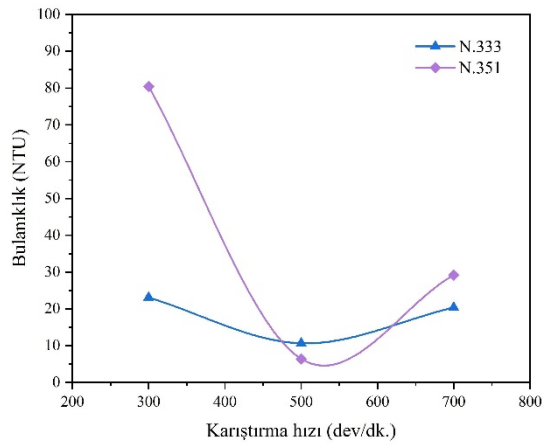
Figure 2. Effect of suspension pH on flocculation efficiency [Stirring speed: 500 rpm, Stirring time: 2 minutes, Solid ratio: 0.2%]

N.333 ve N.351 flokülantlarının kullanımı ile geniş bir pH aralığında yüksek flokülasyon verimleri elde edilmiştir (Şekil 2). Özellikle N.351 flokülantı, pH 6.1'de %98.5 ile en yüksek flokülasyon verimi göstermiştir. Bu sonuç, aynı pH'da Şekil 1'de gösterilen en düşük bulanıklık değeri olan 6.4 NTU ile uyumludur. N.333 flokülantı ise pH 6.1'de %97.5 flokülasyon verimi sağlarken, bulanıklık değeri 10.4 NTU olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, her iki flokülant için yüksek flokülasyon verimi ve düşük bulanıklık değerleri, süspansiyonun ortam pH'sı olan 6.1'de elde edilmiştir. Bu nedenle, diğer parametrelerin etkisi incelenirken süspansiyon pH değeri 6.1 olarak seçilmiştir.

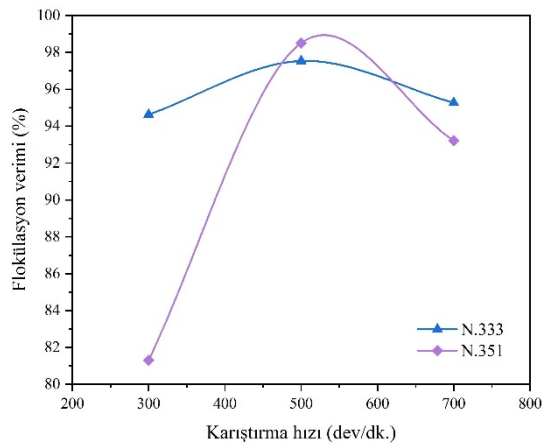
Karıştırma hızının etkisi

Feldispat flokülasyonunda karıştırma hızının süspansiyon bulanıklığı ve flokülasyon verimi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deneyler 300, 500 ve 700 dev/dk. hızlarında gerçekleştirilmiştir. Karıştırma hızının süspansiyon bulanıklığına etkisi Şekil 3'de, flokülasyon verimindeki etkisi ise Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3. Karıştırma hızının bulanıklığa etkisi [Süspansiyon pH: 6.1, Karıştırma süresi: 2 dakika, Katı oranı: %0.2]

Figure 3. Effect of stirring speed on turbidity [Suspension pH: 6.1, Stirring time: 2 minutes, Solid ratio: 0.2%]



Şekil 4. Karıştırma hızının flokülasyon verimine etkisi [Süspansiyon pH: 6.1, Karıştırma süresi: 2 dakika, Katı oranı: %0.2]

Figure 4. Effect of stirring speed on flocculation efficiency [Suspension pH: 6.1, Stirring time: 2 minutes, Solid ratio: 0.2%]

N.333 ve N.351 flokülantları ile gerçekleştirilen deneylerde, karıştırma hızına bağlı olarak süspansiyon bulanıklık değerlerinde belirgin değişimler gözlenmiştir (Şekil 3). 300 dev/dk. karıştırma hızında bulanıklık değerlerinin yüksek, 500 dev/dk. hızda ise belirgin şekilde azaldığı, karıştırma hızının 700 dev./dk.'ya yükseltilmesiyle birlikte bulanıklık değerlerinin tekrar arttığı görülmektedir. Bu durum, optimum flokülasyon koşullarının orta seviyede bir karıştırma hızı olan 500 dev/dk.'da gerçekleştiğini göstermektedir.

Şekil 4'de verilen karıştırma hızına bağlı olarak flokülasyon verimleri incelendiğinde, her iki flokülantın

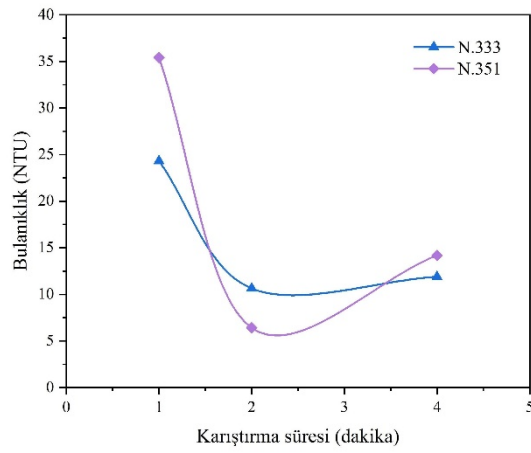
da düşük (300 dev/dk.) ve yüksek (700 dev/dk.) karıştırma hızlarında düşük performans gösterdiği görülmektedir. Bu durum, söz konusu karıştırma hızlarındaki yüksek bulanıklık değerleri ile uyumludur. Düşük karıştırma hızında (300 dev/dk.) elde edilen düşük flokülasyon verimi, süspansiyondaki tanecikler arasındaki çarpışmanın yetersiz olması nedeniyle tanelerin etkin bir şekilde bir araya gelememesi ve flok oluşumunun sınırlanmasıyla açıklanabilir. 700 dev/dk. yüksek karıştırma hızında ise oluşan flokların parçalandığı ve bu nedenle flokülasyon veriminin azaldığı görülmektedir. Uygulanan yüksek karıştırma hızıyla oluşan yoğun kesme kuvvetleri, mevcut floklar üzerinde yıkıcı etki oluşturarak flokların dağılarak ayrılmasına neden olmakta ve bu parçalanmış yapıların yeniden birleşme eğilimleri azalmakta ve bazı durumlarda tekrar floküle olamamaktadırlar (Hogg, 2000).

Deneyler sonucunda, 500 dev/dk. karıştırma hızında N.333 flokülantı ile %97.5, N.351 flokülantı ile ise %98.5 en yüksek flokülasyon verimleri elde edilmiştir. Aynı koşullarda en düşük bulanıklık değerleri, sırasıyla N.333 için 10.4 NTU ve N.351 için 6.4 NTU olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, diğer proses parametrelerinin etkisi incelenirken karıştırma hızı 500 dev/dk. olarak belirlenmiştir.

Karıştırma süresinin etkisi

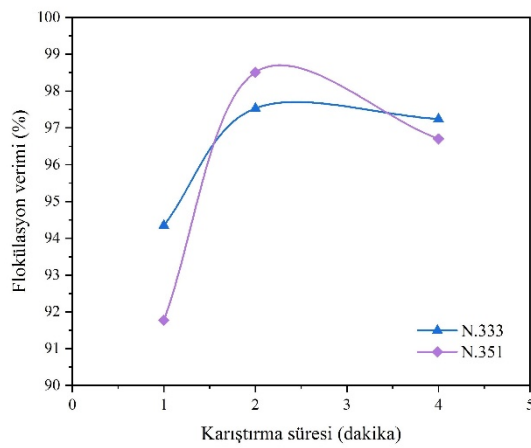
Karıştırma süresinin süspansiyon bulanıklığı ve flokülasyon verimi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 1, 2 ve 4 dakika karıştırma sürelerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Karıştırma süresine bağlı olarak süspansiyon bulanıklığı değerleri Şekil 5'de, flokülasyon verimine etkisi ise Şekil 6'da gösterilmiştir.

N.333 ve N.351 flokülantlarının karıştırma süresine bağlı olarak süspansiyon bulanıklık değerleri incelendiğinde (Şekil 5), 1 dakikalık karıştırma süresinde yüksek bulanıklık değerlerinin elde edildiği, 2 dakikalık karıştırma süresinde ise bulanıklık değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ancak karıştırma süresinin 4 dakika'ya çıkartılmasıyla birlikte bulanıklık değerlerinin yeniden arttığı görülmektedir. Bu durum, optimum flokülasyon koşullarının 2 dakikalık karıştırma süresinde sağlandığını göstermektedir.



Şekil 5. Karıştırma süresinin bulanıklığa etkisi [Süspansiyon pH: 6.1, Karıştırma hızı: 500 dev/dk., Katı oranı: %0.2]

Figure 5. Effect of stirring time on turbidity [Suspension pH: 6.1, Stirring speed: 500 rpm, Solid ratio: 0.2%]



Şekil 6. Karıştırma süresinin flokülasyon verimine etkisi [Süspansiyon pH: 6.1, Karıştırma hızı: 500 dev/dk., Katı oranı: %0.2]

Figure 6. Effect of stirring time on flocculation efficiency [Suspension pH: 6.1, Stirring speed: 500 rpm, Solid ratio: 0.2%]

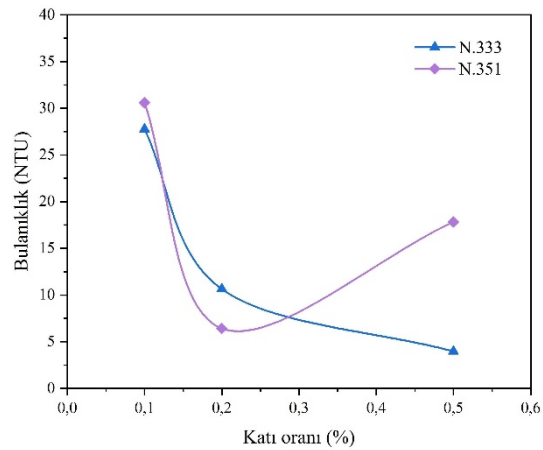
Karıştırma süresine bağlı olarak flokülasyon verimleri incelendiğinde (Şekil 6), her iki flokülant ile 1 ve 4 dakikalık karıştırma sürelerinde düşük flokülasyon verimleri elde edilmiştir. Bu durum, aynı karıştırma sürelerindeki yüksek bulanıklık değerleri ile uyumludur. Flokülasyon verimleri açısından da en yüksek değerlerin 2 dakikalık karıştırma süresinde elde edildiği belirlenmiş olup, daha kısa veya uzun sürelerde verimliliğin azaldığı tespit edilmiştir. Flokülasyonda en uygun karıştırma süresi, optimum flokülant miktarının belirlenebilmesi için diğer bir ifade ile partikül yüzey alanının yaklaşık yarısının flokülant ile kaplanabilmesi için gerekli olan süredir. Karıştırma süresinin fazla olması durumunda,

flokülantların partikül yüzeyine aşırı adsorpsiyonu meydana gelebilmekte ve bu durum sterik engellemeler oluşturarak flokülasyon verimini olumsuz yönde etkilemektedir (Somasundaran and Das, 1998). Öte yandan, karıştırma süresinin çok kısa olması (örneğin 1 dakika), flokülantların partikül yüzeyine yeterli düzeyde adsorbe olamaması ve partiküller arası çarpışmaların yeterince gerçekleşmemesi nedeniyle flokülasyon veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle diğer proses parametrelerinin etkisi incelenirken karıştırma süresi 2 dakika olarak seçilmiştir.

Katı oranının etkisi

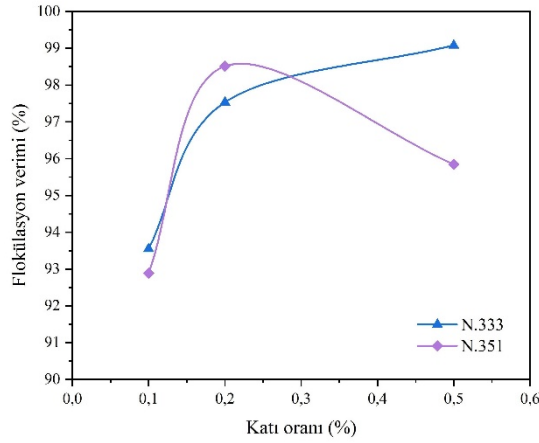
Feldispat flokülasyonunda katı oranının etkisini belirlemek amacıyla %0.1, %0.2 ve %0.5 katı oranlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Katı oranının süspansiyon bulanıklığına etkisi Şekil 7'de, flokülasyon verimi üzerindeki etkisi ise Şekil 8'de gösterilmiştir.

N.333 ve N.351 flokülantlarının katı oranına bağlı olarak bulanıklık değerleri incelendiğinde (Şekil 7), N.333 flokülantı için %0.1 katı oranında en yüksek bulanıklık değeri (28.0 NTU) elde edilmiştir. Katı oranı arttıkça bulanıklık değeri belirgin bir şekilde azalmış ve %0.5 katı oranında en düşük bulanıklık değeri (4.0 NTU) elde edilmiştir. N.351 flokülantı için ise %0.1 katı oranında yüksek bir bulanıklık değeri gözlemlenmiş, bu değer %0.2 katı oranında azalmış, ancak katı oranının %0.5'e artırılması ile birlikte bulanıklık değeri yeniden artmıştır.



Şekil 7. Katı oranının bulanıklığa etkisi [Süspansiyon pH: 6.1, Karıştırma hızı: 500 dev/dk., Karıştırma süresi: 2 dakika]

Figure 7. Effect of solid ratio on turbidity [Suspension pH: 6.1, Stirring speed: 500 rpm, Stirring time: 2 minutes]



Şekil 8. Katı oranının flokülatiyon verimine etkisi [Süspansiyon pH: 6.1, Karıştırma hızı: 500 dev/dk., Karıştırma süresi: 2 dakika]

Figure 8. Effect of solid ratio on flocculation efficiency [Suspension pH: 6.1, Stirring speed: 500 rpm, Stirring time: 2 minutes]

N.333 ve N.351 flokülatantlarının katı oranına bağlı olarak flokülatiyon verimleri incelendiğinde (Şekil 8), N.333 flokülatantı için katı oranı arttıkça flokülatiyon veriminin arttığı görülmektedir. %0.5 katı oranında maksimum flokülatiyon verimi %99.1 olarak elde edilmiştir. Katı oranındaki artış, partiküllerin birbirleriyle çarpışma olasılığını artırarak hızlı ve etkin bir flokülatiyonu desteklemektedir. Ayrıca, salkımların karıştırmaya karşı gösterdikleri denge de katı oranı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Karıştırma sonrasında parçalanmış bir salkımın yeniden oluşabilmesi, partiküller arasındaki etkileşim süresine bağlıdır. Düşük katı oranlarında bu etkileşim süresi uzamakta ve böylece flokülatant daha uzun süre aynı partikül üzerine adsorbe olmaya çalışmaktadır. Bu durum, köprü sayısının azalmasına ve sonuç olarak flokülatiyon verimi düşmesine yol açmaktadır (İpekoğlu, 1997). N.351 flokülatantı için ise %0.1 ve %0.5 katı oranlarında daha düşük olan flokülatiyon verim değerleri elde edilirken, %0.2 katı oranında en yüksek verim %98.5 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, N.351 flokülatantının ortalama katı oranlarında daha etkili olduğu ve yüksek katı oranlarında flokülatiyon veriminin azaldığını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, süspansiyonun bulanıklığı ve flokülatiyon verimliliği ile birlikte değerlendirildiğinde, N.333 flokülatantı için en uygun katı oranının %0.5, N.351 flokülatantı için ise %0.2 olduğu sonucuna varılmaktadır.

Sonuçlar

Bu çalışmada, non-iyonik karakterli Magnafloc 333 (N.333) ve Magnafloc (N.351) flokülatantları kullanılarak feldispat süspansiyonlarının flokülatiyon davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda; süspansiyon pH'sı, karıştırma hızı, karıştırma süresi ve katı oranı parametrelerinin süspansiyon bulanıklığı ve flokülatiyon verimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Deneysel sonuçlara göre, her iki flokülatant için optimum süspansiyon pH'sı 6.1, karıştırma hızı 500 dev/dk. ve karıştırma süresi 2 dakika olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda, N.333 flokülatantı ile %97.4 flokülatiyon verimi ve 10.4 NTU bulanıklık, N.351 flokülatantı ile ise %98.5 flokülatiyon verimi ve 6.4 NTU bulanıklık elde edilmiştir. N.333 flokülatantı için optimum katı oranı %0.5 olarak belirlenmiş, bu koşulda %99.1 flokülatiyon verimi ve 4.0 NTU bulanıklık elde edilmiştir. N.351 flokülatantı için ise optimum katı oranı %0.2 olarak belirlenmiş, bu koşulda %98.5 flokülatiyon verimi ve 6.4 NTU bulanıklık elde edilmiştir.

Kaynaklar

- Bolto B and Gregory J. 2007. Organic polyelectrolytes in water treatment. Water Research, 41(11): 2301-2324. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.012>.
- Cao BC, Gao BY, Xu CH, Fu Y and Liu X. 2010. Effects of pH on coagulation behavior and floc properties in Yellow River water treatment using ferric based coagulants. Chinese Science Bulletin, 55: 1382-1387. doi: 10.1007/s11434-010-0087-5.
- Dao VH, Cameron NR and Saito K. 2016. Synthesis, properties and performance of organic polymers employed in flocculation applications. Polymer Chemistry, 7: 11-22 <https://doi.org/10.1039/C5PY01572C>.
- Dryzmala J. 2007. Mineral processing, Foundations of theory and practice of mineralurgy, 1st English edition, Wroclaw, Poland: Wroclaw University of Technology, pp. 449-463.
- Gregory J. 2013. Flocculation fundamentals. Encyclopedia of Colloid and Interface Science, Ed: Tadros T, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 459-491.
- Gregory J and Barany S. 2011. Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures, Advances in Colloid and Interface Science, 169 (1): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.06.004>.
- Hogg R. 2000. Flocculation and dewatering. International Journal of Mineral Processing, 58(1-4): 223-236. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00023-X).
- Kılıç D. 2023. Dünyada ve Türkiye'de feldispat. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, 58 s, Ankara, Türkiye.
- Özkan A. 2021. Feldispat mineralinin flokülatiyon ile çöktürme karakteristiklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
- İpekoğlu Ü. 1997. Susuzlandırma ve yöntemleri. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:179, s. 112, İzmir.
- Somasundaran P and Das KK. 1998. Flocculation and selective flocculation-An overview. Innovations in mineral and coal

processing. Eds: Atak S, Önal G, Çelik MS, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.

Wills BA and Napier-Munn TJ. 2006. Wills' mineral processing technology: An introduction to practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7th Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K., pp. 378-381.

Yang Y, Wang H, Klein B, Wu A. 2020. Shear-dependent yield stress of iron ore fine tailings in two-step flocculation process. *Advances in Materials Science and Engineering*, 6611392.



Correlation Analysis between Yield and Yield Components in some Black Cumin (*Nigella Sativa* L.) Genotypes

Çiğdem Bozdemir^{1,a,*}, Serkan Uranbey^{2,b}

¹Ankara Field Crops Central Research Institute, Ankara, Türkiye

²Faculty of Agriculture, University, Ankara, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 25/04/2025

Accepted: 19/06/2025

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

Numerous studies have explored the seed yield, other yield standards, quality, and medical properties of the black cumin plant. However, the number of studies regarding the correlation between yield and yield components to improve plant production is limited. Therefore, a correlation analysis was performed to evaluate the relation between the yield and some yield components of black cumin genotypes with different origins at advanced yield stage and grown under ecological conditions in Ankara in accordance with the principles of organic agriculture. This study was performed in summer, in the year of 2019-2020 with three repetitions. A total of 31 black cumin genotypes with different origins at advanced yield stage, including the Çameli registered cultivar, were utilized for the experiments. Our research determined the correlation values between growing time, plant height, flowering time, number of branches, seed yield, emergence time, numbers of seeds per capsules, height of the first capsule, fixed oil yield, numbers of capsules, fixed oil ratio and thousand-seed weight. Based on the results, it was confirmed that fixed oil yield (0,964**), number of branches (0,298**), number of capsules (0,313**), thousand-seed weight (0,192**), number of seeds in capsules (0,382**) have positive and significant effects; and growing time (-0, 151*) has negative and significant effects on seed yield. Emergence time (-0,239**) and thousand-seed weight (-0,144*) have negative and significant effects; oil yield (0,297**) has positive and significant effects on fixed oil ratio. It also demonstrated that the yield and the fixed oil ratio of black cumin will be increased by improving the positive and significant effects of the mentioned variables on seed yield and fixed oil ratio, as the other parameters are held constant. As a result, this study suggests that it is crucial to consider the traits mentioned in breeding studies.

Keywords: Black cumin, organic agriculture, correlation, yield and yield components

Bazı Çörek Otu (*Nigella Sativa* L.) Genotiplerinin Verim ve Verim Unsurları Arasındaki Korelasyon Analizi

Araştırma Makalesi

Süreç

Geliş: 25/04/2025

Kabul: 29/06/2025

ÖZ

Çörek otu bitkisinin, tohum verimi ve diğer verim kriterleri, kalite ve tıbbi özelliklerine ait farklı birçok araştırma yapılmıştır. Ancak, bitkinin üretimini iyileştirmek için verim ve diğer verim parametreleri arasındaki ilişki hakkında yapılan çalışma sayısı sınırlıdır. Bu nedenle, Ankara ekolojik koşullarında organik tarım ilkelerine uygun şekilde yetiştirilen ileri verim kademesindeki farklı orijinlere sahip çörek otu genotiplerinin verim ile bazı verim öğelerinin arasındaki ilişkileri ölçmek için korelasyon analizi yapılmıştır. Çalışma 2019-2020 yıllarında yazlık, 3 tekerrürlü olarak yürütülmüştür. Denemede Çameli çeşidi ile birlikte ileri verim kademesinde bulunan 30 farklı orijinli çörek otu olmak üzere toplam 31 çörek otu genotipi kullanılmıştır. Çalışmada olgunlaşma süresi, bitki boyu, çiçeklenme süresi, dal sayısı, tohum verimi, çıkış süresi, kapsüldeki tane sayısı, ilk kapsül yüksekliği, sabit yağ verimi, kapsül sayısı, sabit yağ oranı ve bin tane ağırlığı özellikleri arasındaki korelasyon değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; tohum verimi üzerine sabit yağ verimi (0,964**), dal sayısı (0,298**), kapsül sayısı (0,313**), bin tane ağırlığı (0,192**), kapsüldeki tane sayısının (0,382**) pozitif ve önemli; olgunlaşma süresinin (-0,151*) negatif ve önemli; sabit yağ oranı üzerine çimlenme süresi (-0,239**) ve bin tane ağırlığının (-0,144*) negatif ve önemli, yağ veriminin (0,297**) pozitif ve önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu değişkenlerin tane verimi ve sabit yağ oranı üzerindeki olumlu ve önemli etkileri, diğer değişkenler sabit tutulduğunda, bu özelliklerin iyileştirilmesinin çörek otunun verim ve sabit yağ oranını artıracak olduğunu göstermektedir. Bu yüzden, ıslah çalışmalarında bu özelliklerin dikkate alınmasının önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çörek otu, organik tarım, korelasyon, verim ve verim unsurları

^a cbozdemir72@hotmail.com

^b 0000-0002-8719-6565

uranbey@ankara.edu.tr

0000-0002-0312-8099

How to Cite: Bozdemir Ç, Uranbey S (2025) Correlation Analysis between Yield and Yield Components in some Black Cumin (*Nigella Sativa* L.) Genotypes, Journal of Science and Technology, 4(1): 59-65

Giriş

Nigella sativa L., dünyada kuzey ve güney yarım kürede yayılış gösteren 58 cins ve 1758 türü bulunan, ülkemizde ise 17 cins ve 234 türü yayılış gösteren, bir veya çok yıllık otsu, nadiren çalimsı ya da tırmanıcı bitkileri barındıran Ranunculaceae (dügünçeğigiller) familyasının önemli bir üyesidir (Ekmekçigil, 2006). Bitkinin biyolojik özellikleri ve adaptasyon kabiliyeti, çok çeşitli toprak ve iklim koşullarında yetiştirilmesine olanak tanır (Prakhova, 2022). Bu tür, Mısır, Hindistan, Suriye, İran, Türkiye, Özbekistan, Tacikistan, Gürcistan, Fas, Etiyopya, Irak ve Cezayir'in farklı bölgelerinde yetiştirilmektedir (Uzzan ve ark., 2024). Bitki zengin bir tarihsel geçmişe sahip olması, biyolojik aktif bileşenleri ve sağlık yararları nedeniyle, mucizevi tıbbi bitki olarak kabul edilir (Gholamnezhad ark., 2016; Mukhtar ve ark., 2019).

N. sativa tohumları %0,4-2,5 uçucu yağ, %30-38 sabit yağ ve protein ve saponinler ve flavonol triglikozitler gibi 100'den fazla çeşitli fitokimyasal bileşen içerir (Cheikh-Rouhou ve ark., 2007). Sabit yağın majör bileşenleri linoleik asit, oleik asit ve palmitik asittir (Saleh Al-Jassir, 1992; Takturi ve Dameh, 1998). Uçucu yağında bulunan en kritik biyoaktif bileşik olan timokinonla birlikte, nigellon (ditimokinon), nigillin, melantin ve trans-anetol gibi diğer yüksek değerli bileşenler; antioksidan, antiinflamatuvar, antimikrobiyal, antioksidan, antialerjik, analjezik, immünomodülatör, antitümör, antihiperlipidemik, hepatoprotektif, kardiyoprotektif ve antidiyabetik etkilerden sorumludur (Ahmad ve ark., 2013; Gholamnezhad ve ark., 2016; Mazaheri ve ark., 2019; Mukhtar ve ark., 2019).

Çörek otu bitkisinin, üyesi olduğu diğer tıbbi bitkiler gibi; ekonomik, ekolojik, çevresel ve sosyal soruna yol açan gübreleme ve herbisit kullanımını sınırlandırmak ya da sonlandırmak adına iyi tarım uygulamaları/organik tarım yöntemi ile yetiştirilmesinin önemi tüm dünyada kabul edilmiş ve destek gören bir üretim metodudur. Özellikle son yıllarda sağlık ve çevresel faydaları nedeniyle katkı maddeleri olarak kullanılmak üzere bu bitki grubundan organik yetiştirme ile elde edilen farmasötik ürünlere talep, oldukça artmıştır. Organik tarım; insan, hayvan ve bitki sağlığını tehdit eden ve çevresel tehdit oluşturan, kimyasal gübrelerin, sentetik ilaçların kullanılmadığı her aşaması sertifikalı, kontrollü ve kaliteli üretim şeklidir. Ülkemizde organik olarak üretimi 10 ton ve üzeri olan 27 tıbbi bitki bulunmaktadır (Yaldız ve ark., 2019). Buna rağmen bu bitkilerin organik üretimine yönelik organik tohumluk üretimiyle alakalı bir çalışma bulunmamaktadır (Kırıcı, 2015). İyi Tarım Uygulamaları ise organik tarıma kıyasla daha esnek koşullara sahip olan; üretim öncesi, üretim, hasat ve hasat sonrası dönemlerde gıda güvenliğini sağlamak için çiftliklerde uygulanması gereken uygulamalar olup bu tür uygulamalar birçok durumda çalışanların ve çevrenin güvenliğini sağlamaya yardımcıdır (Arslan vd. 2015). Dünya Sağlık Teşkilatı (WHO) üye ülkelerin isteği doğrultusunda tıbbi bitkiler için ayrı iyi tarım ve toplama uygulamaları (GACP-2003) ve baharatlar için ayrı iyi tarım uygulamaları (IOSTA2013) düzenlenmiştir. Bu çalışmalarda kaliteli ürün için uygun yetiştirme, toplama ve işleme ile ilgili gerekli teknikler ve önlemler konusunda ayrıntılı açıklamalara yer verilmiştir. Tıbbi

ve aromatik bitkilerde sürdürülebilir üretim ve pazar potansiyelini yeterince değerlendirmek için bu ürünlerin istenen miktarda ve kalitede olması gerekmektedir. Kalite içinse GAP (Good Agricultural Practice) "İyi Tarım Uygulamaları" ve GMP (Good Manufacturing Practice) "İyi İlaç Üretim" kurallarına sıkı sıkıya bağlı bir şekilde üretim yapılmalıdır.

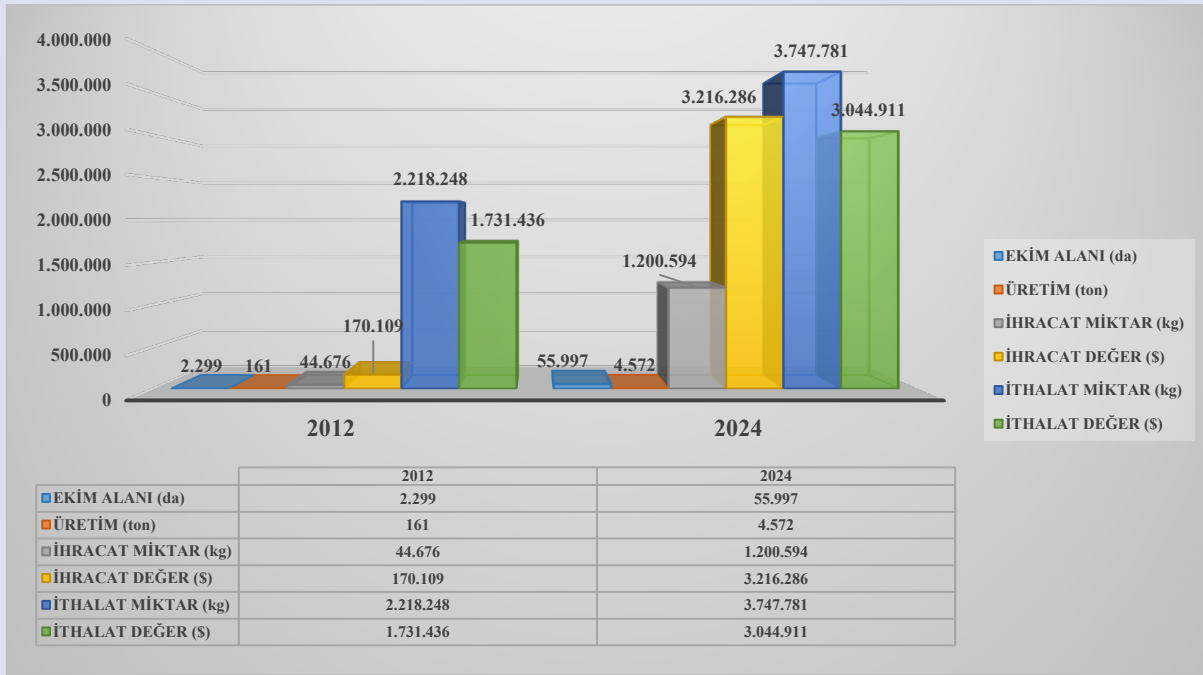
Çörek otu bitkisinin resmi kayıtların alındığı 2012 yılından itibaren ekim alanlarının artması ve buna paralel olarak ihracat miktar ve gelirinin artması sevindirici olsa da, ithalat rakamları ülkemizin hali hazırda bu bitki bakımından istenilen üretim seviyesinde olmadığına bir göstergesidir (Grafik 1). Birincil hedef ekim alanlarının artırılmasından ziyade birim alandan alınan verimin artırılmasıdır. Bunun için; çörek otu çeşitlerinin geliştirilmesine yönelik ıslah çalışmalarının yapılması son derece önemlidir. Bitki ıslahının en önemli hedeflerinin başında ise bitkinin tohum verimini ve kalitesini artırmak gelmektedir.

Islahın başarılı olması; bu iki kriter üzerine etkili olan faktörleri, bunların etki derecelerini ve birbirleri ile olan ilişkilerin doğru belirlenmesini, seçimlerin buna uygun yapılmasını gerektirmektedir (Torun ve Köycü, 1999). Herhangi iki karakter arasındaki ilişkinin doğası ve kapsamı hakkında bilgi korelasyon çalışmaları tarafından sağlanır (Russinga ve ark., 2020). Golparvar ve ark. (2014), ekoloji ve genotipe göre çörek otu veriminin değiştiğini, bu nedenle seçim kriteri olarak tohum veriminin yanı sıra, morfolojik özelliklerinde dikkate alınmasının önemli olduğunu; verim ile diğer önemli tarımsal özellikler arasındaki ilişkilerin ve doğrudan etkilerinin belirlenmesinin çeşit geliştirme çalışmalarında çok önemli olduğunu bildirmişlerdir.

Bu çalışma organik tarım sistemine uygun yetiştirilen, çok sayıda çörek otu hatlarının verim ile bazı verim unsurları arasındaki ilişkileri, özellikle ıslah çalışmalarına katkı sağlamak için bu unsurların tohum verimi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Materyal ve Metod

Bu araştırma 2019-2020 yıllarında Ankara TARM (Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü) deneme tarlalarında gerçekleştirilmiştir. Çörek otu ıslah programından gelen, 1 tanesi çeşit (Çameli) olmak üzere yurt içi ve yurt dışından 31 *Nigella sativa* L. genotipi deneme materyali olarak kullanılmıştır (Tablo 1). Tesadüf bloklarında deneme deseni metoduna uygun, 3 tekerrürlü (parsel ölçüsü 7.5m²) olarak kurulan çalışmada herhangi bir gübreleme ya da ilaçlama işlemi uygulanmazken; sulama 2019 yılında bir kez Mayıs ayında yapılmış ama 2020 yılında sulamaya ihtiyaç duyulmamıştır. Ekim zamanları 12-13 Mart 2019, 4-5 Mart 2020; hasat zamanları ise 2-10 Ağustos 2019, 23 Temmuz-5 Ağustos 2020 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Tohumluk miktarı dekara 1,5 kg olarak hesap edilmiştir. Bitkide dal sayısı, bitki boyu, bitkide kapsül sayısı, ilk kapsül yüksekliği; her parselden kenarlardaki 1'er sıra ve parsel başlarından kenar tesiri olarak 0,5 m çıkarıldıktan sonra tesadüfi olarak seçilen 10 bitki üzerinden; kapsülde tane sayısı tesadüfi olarak seçilen 20 bitki üzerinden; dekara tohum verimi ise parsel verimi üzerinden hesaplanmıştır.



Resim 1. Çörek otu Üretim, ekim alanı, ihracat ve ithalat Verileri (Anonim, 2025)

Figure 1. Black cumin production, cultivation area, export and import data (Anonymous, 2025)

Yapılan analiz sonuçlarına göre; deneme alanlarına ait toprak özellikleri 2019 yılında killi (C) yapıda, hafif alkali (pH'sı 7,95), kireçli (%30,5), tuzsuz (0,60 dS m⁻¹) ve 2020 yılında killi-tınlı (CL) yapıda, hafif alkali (pH'sı 7,73), kireçli (%30,0), tuzsuz (0,64 dS m⁻¹) olarak tespit edilmiştir. Her iki yılda (yıllar itibarıyla sırasıyla); alınabilir fosfor (P: 4,50-4,50 kg da⁻¹), mangan (Mn: 2,99-3,03 ppm), organik madde (%1,55-1,97), çinko (Zn: 0,28-0,30 ppm) içeriği az, potasyum (K: 207-306 kg da⁻¹) miktarı yüksek, demir (Fe: 3,43-3,38 ppm) orta, bakır (Cu: 1,29-1,33 ppm) yeterli,

kalsiyum (Ca: 7118-7420 ppm) ve magnezyum (Mg: 921-905 ppm) iyi seviyede bulunmuştur.

Araştırma yerinin 2019, 2020 ve uzun yıllar vejetasyon döneminde (Mart-Ağustos) altı aylık ortalama sıcaklıkları sırasıyla 14,4 °C, 15,0 °C ve 15,4 °C; toplam yağış 103,8 mm, 111,6 mm ve 171,9 mm; nisbi nem %55,3, %50,9 ve %58,5 olarak ölçülmüştür (Anonim, 2020).

Araştırmada incelenen özellikler arasındaki ilişkilerin derecesi ve yönü MINITAB programında korelasyon analizi ile tespit edilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Çörek Otu Genotipleri Ve Orijinleri

Table 1- Origins And Genotypes Of Black Cumin Used In The Study

GN	Orijin	GN	Orijin
1	Denizli	17	Borsa
2	Denizli	18	Borsa
3	Burdur	19	Borsa
4	Burdur	20	Borsa
5	Etiyopya	21	Hindistan
6	Suriye	22	Bursa/ Keles
7	Mısır	23	Gazi Osmanpaşa (GOP) Üniv. Ziraat Fak
8	Suriye	24	Afyonkarahisar
9	Denizli	25	USDA- Pakistan
10	Burdur/Yeşilova	26	USDA- Mısır
11	Burdur/ Kemer	27	Burdur
12	Konya/ Akören1	28	Kırıkkale/Halitli Köyü
13	Konya/Meram	29	Ankara
14	Konya/ Akören2	30	Ankara
15	Diyarbakır	31	Çameli (Çeşit)
16	Suriye		

GN: Genotip numarası

Bulgular ve Tartışma

Araştırmada incelenen özellikler arası ilişkilerin belirlenmesi amacıyla yapılan korelasyon analizi sonuçları Tablo 2’de verilmiştir

Analiz sonuçlarına göre; karakterler arasında tespit edilen en yüksek korelasyon değerleri; kapsül sayısı ile kapsüldeki tane sayısı (0,538**), bitki boyu ile kapsüldeki tane sayısı (0,569**), çiçeklenme süresi ile bin tane ağırlığı (-0,612**), bitki boyu ile çiçeklenme süresi (0,687**), dal sayısı ile kapsül sayısı (0,753**), çiçeklenme süresi ile ilk kapsül yüksekliği (0,761**), bitki boyu ile ilk kapsül yüksekliği (0,953**) ve tohum verimi ile sabit yağ verimi (0,964**) arasında bulunmuştur.

Tablo 2’nin incelenmesinden görüleceği gibi, tohum verimi ile sabit yağ verimi (0,964**), kapsüldeki tane sayısı (0,382**), kapsül sayısı (0,313**), dal sayısı (0,298**) ve bin tane ağırlığı (0,192**), arasında pozitif ve çok önemli; olgunlaşma süresi (-0,151*) ile arasında negatif ve önemli ilişkiler saptanmıştır. Bu güçlü korelasyon değerleri, bu faktörlerle tohum verimi arasında yakın ilişkiler olduğunu göstermektedir. Pozitif ilişkiler saptanan özelliklere göre değerler arttıkça verim de artacaktır. Araştırma sonucunu destekleyen çalışmalardan; Yılmaz ve ark. (2020) çörek otu verimini; bin tane ağırlığı, dal sayısı, kapsülde tane sayısı ve kapsül sayısının doğrudan etkilediğini bildirmiştir. Kızıl ve Tonçer (2005) tohum verimi ile dal sayısı (0,638**), bin tane ağırlığı (0,758**), kapsül sayısı (0,460*), kapsülde tane sayısı (0,461*) arasında; Koşar (2019) verim ile bin tane ağırlığı (0,5799**), sabit yağ oranı (-0,336**) ve sabit yağ verimi (0,9876**) arasında; Fathinia ve ark. (2023) tohum verimi ile bitkide tohum sayısı, biyolojik verim ve bitkide kapsül sayısı arasında; Mohammed ve ark. (2023) ise verim ile kapsülde tane sayısı ve kapsül sayısı arasında olumlu ve önemli ilişkiler tespit etmişlerdir. Fufa (2016), çörek otu bitkisinde olgunlaşma süresinin uzamasının kapsül oluşumu üzerinde negatif etkiye sahip olduğunu, çiçeklenme ve olgunlaşma süresinin verim ile negatif ilişkiye sahip olması sebebiyle bu iki parametrenin artmasıyla verimin düştüğünü, verim ile bitkide kapsül sayısı ve bitki boyu arasında pozitif ilişki olduğunu, ayrıca korelasyon katsayılarının düşük olmasına rağmen kapsülde tane sayısı ve dal sayısının da verimi pozitif etkileyen etmenler arasında olduğunu bildirmiştir.

Bitki boyu ile dal sayısı (0,203**), kapsül sayısı (0,341**), olgunlaşma süresi (0,437**), çıkış süresi (0,445**), kapsüldeki tane sayısı (0,569**), çiçeklenme süresi (0,687**) ve ilk kapsül yüksekliği (0,953**) arasında pozitif ve çok önemli; bin tane ağırlığı (-0,327**) ile arasında negatif ve çok önemli ilişkiler bulunmuştur (Tablo 2). Bulunan sonuçlara benzer sonuçlar yapılan diğer çalışmalarda da rastlanmıştır. Akgören (2011) tarafından yürütülen bir çalışmada, bitki boyu ile kapsüldeki tane sayısı (0,789**), toplam kapsül sayısı (0,661**), toplam dal sayısı (0,475**) arasında pozitif ve çok önemli; Gashaw ve ark. (2020) bitki boyu ile bitkide kapsül sayısı (0,76**), tohum verimi (0,66**) ile oldukça önemli pozitif; hasat tarihi ile pozitif korelasyon (0,06) ve kapsüldeki tane

tohum sayısı (-0,15) ve 1000 tohum ağırlığı (-0,09) ile negatif korelasyon ilişkisi saptamıştır.

İlk kapsül yüksekliği ile çiçeklenme süresi (0,761**), kapsüldeki tane sayısı (0,491**), çıkış süresi (0,457**), olgunlaşma süresi (0,408**), kapsül sayısı (0,221**) arasında pozitif ve çok önemli; bin tane ağırlığı (-0,387**) ile arasında negatif ve çok önemli ilişkiler tespit edilmiştir (Tablo 2). Araştırma sonucunda; genel olarak uzun boylu genotiplerin ilk kapsül yüksekliklerinin de yüksek olduğu, iki özellik arasında pozitif ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle bitki boyunu olumlu ya da olumsuz etkileyen diğer verim bileşenleri ilk kapsül yüksekliği özelliği üzerinde de aynı etkiye sahip olmuştur.

Bin tane ağırlığı ile sabit yağ verimi (0,153*), dal sayısı (0,197**), kapsül sayısı (0,182*), arasında olumlu ve çok önemli/önemli; sabit yağ oranı (-0,144*), çiçeklenme süresi (-0,612**) ve olgunlaşma süresi (-0,276**) ile arasında negatif ve çok önemli/önemli etki saptanmıştır (Tablo 2). Bin tane ağırlığının tohum verimi ile Gashaw ve ark.(2020) ve Salamatı ve Bagheri (2014) pozitif ama önemsiz; Kızıl ve Tonçer (2005) bitki boyu ile sabit yağ oranı arasındaki ilişkiyi olumsuz ve önemli olarak tespit etmiştir. Diğer taraftan Ürüşan (2016) bin tane ağırlığının; dal sayısı ve bitki boyu ile olumsuz ve önemli, kapsül sayısı ve kapsüldeki tane sayısı ile arasındaki korelasyonu ise olumsuz ve önemsiz olarak; Abdolrahimi ve ark. (2012) bin tane ağırlığı ile verim arasında negatif ve önemli (-0,601**) korelasyon bulmuştur.

Dal sayısı ile sabit yağ verimi (0,307**), kapsül sayısı (0,753**), kapsüldeki tane sayısı (0,53**), arasında pozitif ve çok önemli; çiçeklenme süresi (-0,234**) ile arasında olumsuz ve çok önemli etki görülmüştür. Kapsül sayısı ile sabit yağ verimi (0,32**), kapsüldeki tane sayısı (0,538**) arasında pozitif ve çok önemli ilişkiler bulunmuştur (Tablo 2). Akgören (2011) dal sayısı ile kapsüldeki tohum sayısı (0,564**), toplam kapsül sayısı (0,473**); toplam kapsül sayısı ile ham yağ verimi (0,592**) ve kapsüldeki tohum sayısı (0,569**) arasında pozitif ve önemli olarak bulduğu sonuçlar, bu araştırmadan elde edilen sonuçlarla birebir uyumlu iken; Ürüşan (2016)’ın (dal sayısı ile çiçeklenme süresi, sabit yağ oranı ve kapsüldeki tane sayısı arasında pozitif ve önemli, kapsül sayısı ile dal sayısı arasında ilişki olumlu; kapsül sayısı ile tohum verimi arasında pozitif ve önemli, kapsül sayısı ile kapsüldeki tane sayısı arasında arasında negatif ve önemsiz) ve Gashaw ve ark.(2020)’nın sonuçları ile (kapsüldeki tane sayısı ile dal sayısı arasında olumsuz -0,02; kapsül sayısı ile tohum verimi arasında olumlu ve çok önemli 0,83**, kapsül sayısı ile kapsüldeki tane sayısı arasında olumsuz ve çok önemli -0,34**) kısmen uyumlu olmuştur. Salamtı ve Zeinali (2013) yapmış oldukları çalışmada, tohum veriminin, bitki boyu, bitkide dal sayısı ile önemli ve pozitif bir korelasyonu olduğunu göstermiştir. Mevcut bulguları destekleyen bir başka araştırmanın sonucunda; İran’da Neghab ve Mehrjerdi (2018) tarafından bitkide dal sayısı ile verim arasındaki ilişki pozitif ve önemli olarak kaydedilmiştir. *Nigella sativa*’da her bir dalın ucunda bir kapsül bulunduğu için, dal sayısının artışı kapsül sayısının artışına, bu durumda ise verimin artışına sebep olmaktadır. Bu nedenle, dal sayısı ile arasında tespit edilen olumlu ilişki, beklenen bir durumdur.

Kapsüldeki tane sayısı ile çiçeklenme süresi (0,242**), çıkış süresi (0,178*), sabit yağ verimi (0,382**) arasında pozitif ve önemli/çok önemli ilişkiler saptanmıştır (Tablo 2). Ahmed ve Haque (1986) ve Arslan (1994)'a birim alandan elde edilen bin tane ağırlığı, kapsül ve dal sayısı ve kapsülde tohum miktarı *Nigella sativa*'da verim bakımından dikkat edilecek en önemli faktörlerdir. Yapılan çalışmaların tamamına yakınında kapsüldeki tane sayısı ile tohum verimi arasında pozitif korelasyon tespit edilmiştir (Ürüşan, 2016; Gashaw ve ark.,2020). Haq ve ark. (2015) kapsülde tane sayısının bin tane ağırlığı ile negatif ve çok önemli korelasyon gösterdiğini bildirmiştir. Genel olarak vejetasyon süresi kısaltıkça, bitkide tohum sayısı ile ağırlığının azaldığı tespit edilmiştir.

Çıkış süresi ile çiçeklenme süresi (0,393**) arasında pozitif ve çok önemli; sabit yağ oranı (-0,239**) ile arasında negatif ve çok önemli ilişkiler tespit edilmiştir. Çiçeklenme süresi ile olgunlaşma süresi (0,383**) arasında pozitif ve çok önemli etki görülmüştür. Sabit yağ oranı ile sabit yağ verimi (0,297**) arasında pozitif ve çok önemli ilişkiler bulunmuştur (Tablo 2). Bu sonuçlar bu konuda yapılan diğer araştırma sonuçları ile uyumludur.

Çörek otu bitkisinde çıkış zamanı, %50 çiçeklenme ve olgunlaşma süresi gibi fenolojik özellikler birçok faktöre bağlı olmakla birlikte özellikle iklimle yakından ilişkilidir. Yapılan bu çalışmada % 50 çiçeklenme ve çıkış süresi kısa olan genotiplerin olgunlaşma süresinin de kısa sürdüğü tespit edilmiştir. Çörek otu sabit yağ verimi, yağ oranı ile tohum veriminin ortak bir sonucudur. Bu nedenle aralarındaki ilişki pozitif ve önemli olmaktadır. Gashaw ve ark. (2020) çıkışa kadar geçen gün sayısı %50 çiçeklenme tarihi (0,23*) ile önemli; %50 çiçeklenmeye kadar geçen gün sayısı hasat tarihiyle oldukça önemli (0,64 **); Verma ve ark. (2019) ise çiçeklenme gün sayısı ile olgunlaşma süresi arasında anlamlı pozitif korelasyon tespit etmişlerdir. Etiyopya'da yapılan bir başka çalışmada Yimam ve ark. (2015), çiçeklenme gün sayısı ile, bitki boyu (0,89**), bitkide dal sayısı (0,91**), bitkide kapsül sayısı (0,93**), kapsülde tane sayısı (0,95**), verim (0,95**) ile oldukça anlamlı ve pozitif bir korelasyon olduğunu bildirmişlerdir. Salehi ark. (2016), İran'da yapmış oldukları bir çalışmada çörek otu bitkisinin verimini artırmak için en iyi seçim kriterlerinin tane doluluk oranı, dal sayısı kadar çiçeklenme süresi olduğunu bildirmişlerdir.

Tablo 2. Çörek Otunun Farklı Karakterleri Arasındaki Genotipik Ve Fenotipik Korelasyon Katsayıları

Table 2. Genotypic And Phenotypic Correlation Coefficients Among Different Characters In Nigella Sativa

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Sabit Yağ Verimi
Bitki Boyu	0.089	0.953**	-0.327**	0.203**	0.341**	0.569**	0.445**	0.687**	0.437**	-0.098	0.057
Tohum Verimi (1)		0.072	0.192**	0.298**	0.313**	0.382**	0.031	-0.103	-0.151*	0.043	0.964**
İlk Kapsül Yüksekliği (2)			-0.387**	0.072	0.221**	0.491**	0.457**	0.761**	0.408**	-0.109	0.039
Bin Tane Ağırlığı (3)				0.197**	0.182*	-0.117	-0.034	-0.612**	-0.276**	-0.144*	0.153*
Dal Sayısı (4)					0.753**	0.53*	-0.092	-0.234**	0.035	0.04	0.307**
Kapsül Sayısı (5)						0.538**	0.013	-0.119	0.061	0.051	0.32**
Kapsüldeki Tane Sayısı (6)							0.178*	0.242**	0.142	0.078	0.382**
Çıkış Süresi (7)								0.393**	-0.045	-0.239**	-0.045
Çiçeklenme Süresi (8)									0.383**	-0.042	-0.112
Olgunlaşma Süresi (9)										-0.001	-0.136
Sabit Yağ Oranı (10)											0.297**

** : 0.01 (% 1) çok önemli,

* : 0.05 (% 5) önemli

Sonuçlar

Bu araştırmayla; organik olarak yetiştirilen ileri verim kademesindeki farklı orijinlere sahip çörek otu genotiplerinin verim ile diğer verim kriterleri arasındaki korelasyonun derecesi ve yönü belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışma sonucunda; tohum verimi ile kapsül sayısı, bin tane ağırlığı, dal sayısı, sabit yağ verimi, kapsüldeki tane sayısı arasında pozitif ve çok önemli; olgunlaşma süresi ile negatif ve önemli; sabit yağ oranı, ilk kapsül yüksekliği, çıkış süresi ile pozitif ve önemsiz; çiçeklenme süresi ile negatif ve önemsiz ilişkiler saptanmıştır. Sabit yağ oranı üzerine ise çimlenme süresinin ve bin tane ağırlığının negatif ve önemli, yağ veriminin pozitif ve önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Kültürü yapılan tüm bitkilerde olduğu gibi çörek otu tarımında da verim ve verime bağlı diğer özellikler, bitkinin genetik özelliğinin dışında, iklim faktörleri, toprak özellikleri, yetiştirme tekniklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ülkemizde çörek otu üretiminin artırılması ancak ekim alanlarının artırılmasıyla sağlanmaktadır. Birim alan tane verimini artırmak, yapılacak ıslah çalışmaları ile üstün kalite özelliklerine ve yüksek verim potansiyeline sahip çeşitlerin geliştirilmesi ile mümkündür. Araştırmadan elde edilen sonuçlara göre, verim üzerine önemli ya da çok önemli oranda pozitif etki eden özellikler yüksek tohum verimine katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle bu özelliklerin geliştirilmesi tane verimini artıracığından, çörek otu ıslah programında dikkate alınmasının ve seleksiyon kriteri olarak değerlendirilmesinin başarı oranını artıracığı söylenebilir.

Sonuç olarak bu araştırma; çörek otu verimi ve kalite özelliklerinin ıslah çalışmaları ve tarımsal uygulamalar açısından önemli bir rehber görevi görmesinin yanında, çevresel faktörlerin, genetik çeşitliliğin ve teknolojik yeniliklerin de dikkate alınarak, verimliliği artırmaya yönelik kapsamlı bir yaklaşım geliştirilmesine hizmet edeceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

Abdolrahimi B, Mehdikhani P, Tappe AHG. 2012. The effect of harvest index, yield and yield components of three varieties of black seed (*Nigella sativa*) in different planting densities. International Journal of Agricultural Sciences, 2(1): 93-101. ISSN: 2228-6322

Ahmad A, Husain A, Mujeib M, Khan SA, Najmi AK, Siddique NA, Damanhoury ZA, Anwar F. 2013. A review on therapeutic potential of *Nigella sativa*: A Miracle herb. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 3(5): 337-352. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(13\)60075-1](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(13)60075-1).

Ahmed NU, Haque KR. 1986. Effect of row spacing and time of sowing on the yield of black cumin (*Nigella sativa* L.). Bangladesh Journal of Agriculture, 11(1): 21-24.

Akgören G. 2011. Bazı Çörekotu (*Nigella sativa* L.) Populasyonlarının Tarımsal Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.

Anonim 2020. Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü.

Anonim 2025. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). Web sitesi: www.tuik.gov.tr. Erişim Tarihi 12.06.2025

Arslan N. 1994. Ekim zamanı ve bitki sıklığının çörek otu (*Nigella sativa*) verimine etkisi. Ankara Üniversitesi Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi, 3(1-2): 73-80.

Arslan N, Javani M, Taher M. 2015. Tıbbi Bitkilerin Yetiştiriciliğinde İyi Tarım Uygulamaları. Türkiye Tohumcular Birliği Dergisi (TÜRKTOB), 4(16): 32-38.

Cheikh-Rouhou S, Besbes S, Hentati B, Blecker C, Deroanne C, Attia H. 2007. *Nigella sativa* L.: Chemical composition and physicochemical characteristics of lipid fraction. Food Chemistry, 101(2): 673-681. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.02.022>.

Ekmekçigil M. 2006. Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Herbaryumu (ANK) Ranunculaceae Familyası Revizyonu. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

Fathinia A, Lak S, Farhodi R, Mojadam M, Shokohfar A. 2023. Assess the regression and correlation relationships between the traits affecting the seed yield of black cumin (*Nigella sativa* L.) cultivars affected different planting dates and combined nutrition. Journal of Crop Nutrition Science, 9(3): 49-64. <https://oicpress.com/jcns/article/view/6006>.

Fufa M. 2016. Correlation studies in yield and some yield components of black cumin (*Nigella sativa* L.) landraces evaluated at Southeastern Ethiopia. Advances in Crop Science and Technology, 4: 239. <https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000239>.

Gashaw Z, Gebreselassie W, Hailemichael G. 2020. Correlation and path coefficient analysis in yield and yield-related components of black cumin (*Nigella Sativa* L.) accessions, at Jimma, Southwest Ethiopia. International Journal of Agronomy, 2020(4): 1-9. <https://doi.org/10.1155/2020/8837794>.

Gholamnezhad Z, Havakhah S, Boskabady MH. 2016. Preclinical and clinical effects of *Nigella sativa* and its constituent, thymoquinone: a review. Journal of Ethnopharmacology, 190: 372-386. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2016.06.061>.

Ghorbanzadeh Neghab M, Zare Mehrjerdi M. 2018. The study of genetic diversity, correlation between traits and path analysis in black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes. Journal of Plant Production Research, 25(3): 1-12. <https://doi.org/10.22069/jopp.2018.12268.2111>.

Golparvar AR, Hadipana A, Salehi S. 2014. Investigation of seed yield and oil quality of black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes cultivated in Isfahan Province. Electronic Journal of Biology, 10(1): 7-13.

Haq M, Hossain M, Haque M, Das M, Shamsul Huda M. 2015. Blossoming characteristics in black cumin genotypes in relation seed yield influenced by sowing time. American Journal of Plant Sciences, 6(8): 1167-1183. <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.68121>.

Kırıcı S. 2015. Tıbbi ve Aromatik bitkilerin Gıda Sanayisinde Kullanımı. Türkiye Tohumcular Birliği Dergisi (TÜRKTOB), 15: 4-12.

Kızıl S, Tonçer Ö. 2005 The effect of row spacing on seed yield, yield components, fatty oil and essential oil of *Nigella sativa* L. Crop Research, 107-112

Koşar İ. 2019. Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) Çeşit ve Popülasyonlarının Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, Türkiye.

Mazaheri Y, Torbati M, Azadmard-Damirchi S, Savage GP. 2019. Effect of roasting and microwave pre-treatments of *Nigella sativa* L. seeds on lipase activity and the quality of the oil. Food Chemistry, 274: 480-486. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.001>.

Mohammed MI, Adil MAA, Salman AO, Hassan FF, Youni SS, Mohammad EN. 2023. Effect of spraying with nano-fertilizer npk and the distance between rows on the growth and productivity of *Nigella Sativa* L. Journal of Medical and Industrial Plant Sciences.

- Mukhtar H. Qureshi AS, Anwar F, Mumtaz MW, Marcu M. 2019. *Nigella sativa* L. seed and seed oil: potential sources of high-value components for development of functional foods and nutraceuticals/pharmaceuticals. *Journal of Essential Oil Research*, 31(1): 171-183. <https://doi.org/10.1080/10412905.2018.1562388>.
- Prakhova TY. 2022. Ecological aspects of the productivity of *Nigella varieties* under the conditions of the Middle Volga Region. *Russian Agricultural Sciences*, 48: 169-173. <https://doi.org/10.3103/S1068367422030090>.
- Russinga AM, Srividhya A, Reddy VLN, Latha P. 2020. Correlation studies on yield and yield contributing traits in rice (*Oryza sativa* L.). *Indian Journal of Pure & Applied Biosciences*, 8(5): 531-538. <http://dx.doi.org/10.18782/2582-2845.8334>.
- Salamati MS, Bagheri M. 2014. The study of the relationship between seed yield and yield components on *Nigella Sativa* genotypes. *Research on Crop Ecophysiology*, 9(1): 97-103.
- Salamati MS, Zeinali H. 2013. Evaluation of genetic diversity of some *Nigella sativa* L. genotypes using agromorphological characteristics. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 9(1): 201-213. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2013.2901>.
- Saleh Al-Jassir M. 1992. Chemical composition and microflora of black cumin (*Nigella sativa*) seeds growing in Saudi Arabia. *Food Chemistry*, 45(4): 239-242. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(92\)90153-S](https://doi.org/10.1016/0308-8146(92)90153-S).
- Salehi S, Rokhzadi A, Noormohammadi G, Mirhadi SM, Golparvar AR. 2016. Genetic improvement of quantity/quality yield of black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes cultivated in Iran climatic conditions. *Ghavam, Journal of Herbal Drugs*, 6(4): 187-193.
- Takruri HRH, Dameh AFM. 1998. Study of nutritional value of black cumin seeds (*Nigella sativa* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76(3): 404-410. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199803\)76:3<404:AID-JSFA964>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199803)76:3<404:AID-JSFA964>3.0.CO;2-L).
- Torun M, Köycü C. 1999. Mısır bitkisinde tane verimi ile bazı verim unsurları arasındaki ilişkilerin saptanması. *Türk Tarım ve Ormancılık Dergisi*, 23(5): 1021-1027.
- Uzzan S, Rostevanov IS, Rubin E, Benguigui O, Marazka S, Kaplanski J, Agbaria R, Azab AN. 2024. Chronic treatment with *Nigella sativa* oil exerts antimanic properties and reduces brain inflammation in rats. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(3): 1823. <https://doi.org/10.3390/ijms25031823>
- Ürüşan, Z., 2016. Bazı Çörek Otu (*Nigella sativa* L., *Nigella damascena*) Genotiplerinde Tarımsal ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Verma P, Solanki RK, Dashora A, Kakani RK. 2019. Genetic variability and correlation analysis in *Nigella* (*Nigella sativum* L.) assessed in South Eastern Rajasthan, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(3): 1858-1864. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.803.220>.
- Yaldız G, Çamlıca M, Özen F. 2019. Organik Gübrelemenin Tıbbi Bitkilerin Verim ve Kalite Özelliklerine Etkileri. *Uluslararası Anadolu Ziraat Mühendisliği Bilimleri Dergisi*, 1(3): 37-48.
- Yılmaz G, Bıyık N, Dökülen Ş. 2020. Seçilmiş Bazı Çörek Otu (*Nigella sativa* L.) populasyonlarının Tokat- Niksar şartlarında performanslarının belirlenmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 186-193.
- Yimam E, Nebiyu A, Mohammed A, Getachew M. 2015. Effect of nitrogen and phosphorus fertilizers on growth, yield and yield components of black cumin (*Nigella sativa* L.) at Konta District, South West Ethiopia. *Journal of Agronomy*, 14(3): 112-120. <https://doi.org/10.3923/ja.2015.112.120>.